

# THESES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

---

pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ  
de PARIS**

(Mention SCIENCES)

par Monsieur Jean GUÉRIN

---

Sujet de la 1<sup>ère</sup> Thèse :

## **DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MODÈLE DE CAMÉRA ÉLECTRONIQUE LALLEMAND A FOCALISATION ÉLECTROSTATIQUE**

Sujet de la 2<sup>ème</sup> Thèse :

proposé par la Faculté

soutenues le 3 JUIN 1971 devant la Commission composée de

Président : J. RÖSCH

Examineurs : A. LALLEMAND

J. LEQUEUX

Invité : P. FELENBOK



I

DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MODELE DE CAMERA  
ELECTRONIQUE LALLEMAND A FOCALISATION ELECTROSTATIQUE

-----

La caméra électronique a focalisation électrostatique du Professeur Lallemant, peut être considérée comme un récepteur d'images quasi-parfait. Ce mémoire a pour but de faire le point sur le développement d'un nouveau modèle.

Dans une première partie, nous décrirons le principe de la caméra électronique Lallemant. Nous montrerons que les propriétés de l'effet photoélectrique et de l'effet électronographique sont conservées dans leur association directe : pas de seuil, pas de saturation, et pas de bruit propre. Bien que l'emploi de la caméra électronique soit courant et sûr en astronomie, la description de ce modèle fera apparaître des limites à son utilisation dans les conditions inhabituelles que l'on rencontre lors d'un vol ballon ou lors de missions d'environnement difficile.

Dans une deuxième partie, nous examinerons les conditions de réalisation d'une caméra électronique de type Lallemant. Elles sont relatives à la conservation de la sensibilité de la couche photoémissive, à l'influence de la pression et au maintien de la haute tension sur le bruit de fond. Nous verrons qu'une nouvelle technologie remplit ces conditions.

Dans une troisième partie, nous montrerons que les solutions techniques adoptées pour construire le nouveau modèle élargissent le champ d'utilisation de la caméra électronique en se libérant du milieu ambiant, en augmentant son autonomie et en améliorant sa solidité. Nous en présenterons les premiers résultats obtenus au laboratoire et pendant la mission d'éclipse totale du soleil au Mexique en Mars 1970.



DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU MODELE DE CAMERA  
ELECTRONIQUE LALLEMAND  
A FOCALISATION ELECTROSTATIQUE

-----

I - PRINCIPE DE LA CAMERA ELECTRONIQUE LALLEMAND :

- 1) Le récepteur d'images idéal
- 2) Principe de la caméra électronique Lallemand
- 3) Performances obtenues avec la caméra électronique Lallemand
- 4) Limites d'utilisation
- 5) Autres modèles.

II - CONDITIONS DE REALISATION D'UNE CAMERA DE TYPE LALLEMAND :

- 1) Conservation de la sensibilité de la couche photoémissive
- 2) Obtention de très basses pressions
- 3) Conditions de maintien de haute tension
- 4) Obtention de basse température
- 5) Mécanismes et solidité

III - LA CAMERA ELECTRONIQUE CERAMIQUE-METAL :

- 1) Ensemble caméra électronique
- 2) Ensemble d'introduction de photocathodes
- 3) Alimentation haute tension
- 4) Description de la préparation d'une caméra
- 5) Résultats obtenus au laboratoire
- 6) Résultats obtenus en mission d'éclipse.

IV - CONCLUSION.



## I - PRINCIPE DE LA CAMERA ELECTRONIQUE LALLEMAND

- 1 - Le récepteur d'images idéal.
  - 1-1 - Distribution des photons incidents -
  - 1-2 - Récepteur d'images par échantillonnage proportionnel -
  - 1-3 - Propriétés secondaires -
- 2 - Principe de la caméra électronique Lallemand.
  - 2-1 - L'effet photoélectrique -
  - 2-2 - L'effet électronographique -
  - 2-3 - Association des deux effets -
  - 2-4 - Bruits dus à l'association -
- 3 - Performances obtenues avec la caméra électronique Lallemand.
  - 3-1 - Description technique -
  - 3-2 - Pressions et températures de travail -
  - 3-3 - Seuil à l'enregistrement -
  - 3-4 - Bruit de fond
  - 3-5 - Gain de temps de pose à densité donnée -
  - 3-6 - Linéarité des plaques
  - 3-7 - Tenue des photocathodes
  - 3-8 - Résolution
  - 3-9 - Fiabilité
- 4 - Limites d'utilisation de la caméra électronique Lallemand.
  - 4-1 - Maintien de la haute tension
  - 4-2 - Fragilité -
  - 4-3 - Autonomie
- 5 - Autres modèles de caméras électroniques
  - 5-1 - Caméra électronique de Kron
  - 5-2 - Caméra électronique de Mac Gee
  - 5-3 - Conclusion



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41556004\\_0016](https://archive.org/details/IA41556004_0016)

# I PRINCIPE DE LA CAMERA ELECTRONIQUE LALLEMAND.

La caméra électronique Lallemand est un récepteur de photons quasi parfait. Ses qualités fondamentales découlent de l'utilisation couplée de l'effet photoélectrique et de l'effet électronographique. Ce couplage est réalisé par des moyens ne dégradant pas les propriétés de ces deux effets.

Nous examinerons les caractéristiques théoriques du récepteur idéal et de la caméra électronique Lallemand, ainsi que les causes susceptibles de les altérer. La réalisation de la caméra électronique montre, par les résultats obtenus, qu'elle ne limite pas ces caractéristiques. Cependant, la technologie employée, bien que satisfaisant les conditions d'emploi courantes, introduit des limites d'utilisation dans des conditions d'emploi inhabituelles. D'autres approches du récepteur idéal sont présentées.

## 1 Le récepteur d'images idéal.

Pour restituer toute l'information contenue dans une image, un récepteur doit remplir trois fonctions : l'acquisition, le stockage, l'analyse. La restitution de cette information nécessite au niveau de l'acquisition une analyse temporelle, spectrale et spatiale de tous les photons incidents :  $N(x, y, \lambda, t)$ .

### 1-1 - Distribution des photons incidents

Le signal analysé est constitué d'un nombre  $N$  de photons qui représentent des événements individualisés et de probabilité d'apparition constante. Leur distribution statistique suit une loi binômiale dont l'écart type est égal à  $\sqrt{N}$ , le rapport signal sur bruit étant  $\frac{N}{\sqrt{N}}$ . Ce rapport constitue une limite théorique appelée bruit de photons.

### 1-2 - Récepteur d'images par échantillonnage proportionnel

Si on se limite au cas où l'image n'évolue pas pendant la pose, (hypothèse d'images stationnaires), il suffit de compter un nombre de photons pour chaque élément résolu qui soit proportionnel au nombre de photons incidents constituant le signal. Nous disons que nous réalisons dans ce cas un échantillonnage proportionnel. Pour restituer l'information contenue dans l'image sans dégradation, quelle que soit la distribution spatiale, temporelle et spectrale du flux incident, il faut que le récepteur ne présente ni seuil à l'enregistrement, ni saturation. Cette restitution de l'information, au sens statistique, ne doit pas dégrader le rapport signal sur bruit de la distribution de photons  $N$ .

Suivant Duchesne et Bijaoui [4], on appelle rendement quantique équivalent le coefficient numérique qui rend compte de cette dégradation : c'est le rapport du carré du signal sur bruit réel au carré du rapport signal sur bruit idéal,



$$r = \frac{(\text{signal/bruit})^2_{\text{réel}}}{(\text{signal/bruit})^2_{\text{idéal}}}$$

Pour un récepteur idéal, ce rapport est égal à 1 .

L'obtention d'un tel rendement implique nécessairement une suite de processus statistiques qui suivent une loi binômiale, et une absence de bruit propre du récepteur.

En résumé, les propriétés fondamentales du récepteur d'images par échantillonnage proportionnel sont : absence de seuil et de saturation, absence de bruit propre, conservation de la statistique binômiale.

### 1-3 - Propriétés secondaires

Il n'est pas nécessaire que  $r$  soit égal à 1 pour restituer l'information, contenue dans l'image, avec une précision donnée. Il suffit d'associer le récepteur avec un collecteur de photons plus important (téléscope) pour avoir une statistique sur un plus grand nombre d'évènements, et diminuer la limite minimum du bruit théorique de photons. Cependant il est souhaitable d'avoir des rendements quantiques les plus élevés possibles.

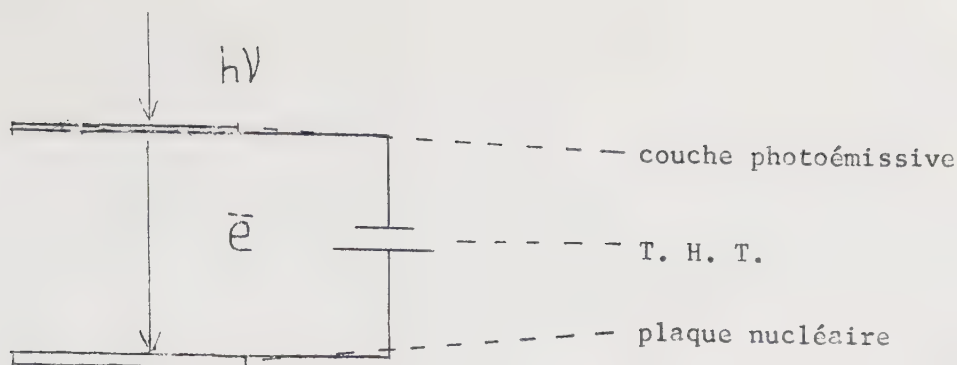
La restitution stigmatique de l'information n'est pas une propriété fondamentale d'un récepteur, car si on connaît le défaut de stigmatisme, il est possible en théorie de restituer l'information originelle par traitement mathématique. Le stigmatisme reste cependant dans la pratique une propriété importante.

## 2 | Principe de la caméra électronique Lallemand.

L'effet photoélectrique est associé à l'effet électronographique sans dégradation des deux effets. L'image de photons est formée sur une couche photoémissive. Les électrons sont émis avec une certaine probabilité sous l'action de photons incidents (effet photoélectrique). Ils sont accélérés et focalisés par une optique électrostatique, puis enregistrés par une plaque photographique sensible aux électrons - (effet électronographique). L'association des deux effets se fait dans une enceinte où règne un vide poussé.

Nous allons étudier les propriétés respectives des deux effets en analysant leurs limites, et les caractéristiques du couplage nécessaire aux qualités des deux effets. Nous verrons ensuite les effets parasites caractérisant la caméra électronique.





### 2-1 - L'effet photoélectrique

A un photon de fréquence  $\nu$ , est associée une énergie  $W = h\nu$  ( $h =$  constante de Planck). Si cette énergie est supérieure à l'énergie de sortie  $W_s$  d'un électron d'un matériau, cet électron est émis avec une vitesse  $V_s$  tel que :  $\frac{1}{2} m V_s^2 = W - W_s$ . Pour que l'électron sorte, son énergie cinétique doit être positive ou nulle, d'où :  $h\nu_0 = W_s$ ,  $\nu_0$  étant la fréquence du seuil photoélectrique. Il n'y aura d'émission que pour  $\nu > \nu_0$  et comme  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  pour  $\lambda < \lambda_0$  on aura  $\lambda_0 = \frac{hc}{W_s}$  soit  $\lambda_0 = \frac{12400}{W_s}$  ( $\lambda_0$  en Angstrom et  $W_s$  en electron volt).

La probabilité  $p$  qu'à chaque photon incident de provoquer l'émission d'un électron est indépendante du flux, Il n'y a donc pas de seuil de détection, ce coefficient  $p$  est le rendement quantique de la couche, que l'on peut aussi définir comme étant le rapport du nombre d'électrons émis au nombre de photons incidents. Si la couche photoémissive est déposée sur un dépôt conducteur écoulant les charges, il n'y a pas de saturation.

Pendant l'unité de temps, pour  $N$  photons reçus, il y aura une émission moyenne de  $Np$  électrons. Le courant électrique généré par ces électrons, présente des fluctuations qui sont régies par la loi binômiale. Ce signal, constitué par des événements individualisables et de probabilité constante, a un écart type égal à  $\sqrt{pN}$ . Le rapport signal sur bruit est donc :  $\sqrt{pN}$ .

Le seuil photoélectrique, ainsi que le rendement quantique, caractérisent la couche photoémissive. La photoémission est en effet liée au pouvoir absorbant de la couche. Par exemple, pour l'argent le seuil photoélectrique est à 2610 Å, mais son très faible rendement quantique ( $5 \times 10^{-6}$ ) à cette longueur d'onde est dû à sa forte réflectivité. On a donc créé des couches composées, à base d'alcalins, ayant un faible travail d'extraction et conservant un fort pouvoir d'absorption. Par exemple, en évaporant du césium sur de l'argent oxydé ou sur de l'antimoine,



Dans ces couches "semi-transparentes", les pertes par réflexion et par transmission sont de l'ordre de 30 %.

Valeurs expérimentales d'énergie de sortie suivant les couches :

| Eléments           | Energie de sortie $W_s$ (eV) | Seuil ( $\text{\AA}$ ) |
|--------------------|------------------------------|------------------------|
| Ag                 | 4,4                          | 2610                   |
| Al                 | 4,1                          | 3500                   |
| Cs                 | 1,9                          | 6600                   |
| Ag/O/Cs            | 0,86                         | 14000                  |
| Sb Cs <sub>3</sub> | 1,9                          | 6600                   |
| (S 20)             | 1,45                         | 8550 *                 |
| (Te Cs)            | 3,8                          | 3260 *                 |

\* valeurs théoriques.

Bruit de l'effet photoélectrique :

L'énergie nécessaire à l'émission d'un électron d'une substance peut être apportée sous trois formes principales : énergies thermique, électrostatique et lumineuse. L'effet photoélectrique étant généré par la seule énergie lumineuse, l'emploi des couches photoémissoires se fera donc sous certaines conditions pour éliminer les effets dus aux autres sources d'énergie. Ces conditions impliquant un refroidissement énergétique, et un champ électrique peu élevé au voisinage de la couche.

Le rendement quantique est variable suivant les endroits de la couche. Par exemple la différence peut atteindre 30 % pour deux points éloignés de 2 cm, 1,5 % pour des points éloignés de 120  $\mu$  et 1 % pour des points éloignés de 60  $\mu$  [1]. Ces variations de rendements quantiques sont mesurables et, en prenant plusieurs plaques d'étalonnage, on arrive à déterminer sa valeur en chaque point avec une précision de 1 %. L'effet photoélectrique est stigmatique car les trajets du photon et de l'électron présentent un écart de l'ordre de 1 Angstrom dans la couche. Les seules aberrations optiques existantes à ce niveau seront dues au support de la couche photoémissoire.

Le rendement quantique dépend de l'incidence et de la direction du plan de polarisation du flux lumineux : quand le vecteur électrique de l'onde électromagnétique est perpendiculaire au plan d'incidence, l'émission est beaucoup plus faible que pour un vecteur parallèle. L'effet est très sensible aux impuretés.

L'émission photoélectrique est fortement influencée par une pollution de la couche (agents oxydants :  $H_2O$ ,  $O_2$ ). L'émission peut même être supprimée. Pour la couche  $SbCs_3$ , une oxydation provoque un déplacement du seuil vers les grandes



longueurs d'ondes, et une diminution du rendement quantique.

Le rendement quantique est variable suivant la nature de la couche, la longueur d'onde, la température (voir fig. 1 & 2)

#### 2-2 - L'effet électronographique :

L'effet électronographique permet d'enregistrer des électrons. Ces électrons rendent développables des grains de bromure d'argent dont la densité et la distribution spatiale permettent de restituer l'information incidente. Cet effet électronographique suit une statistique de Poisson. Il n'a pas de seuil et possède un fort rendement.

.... / ....

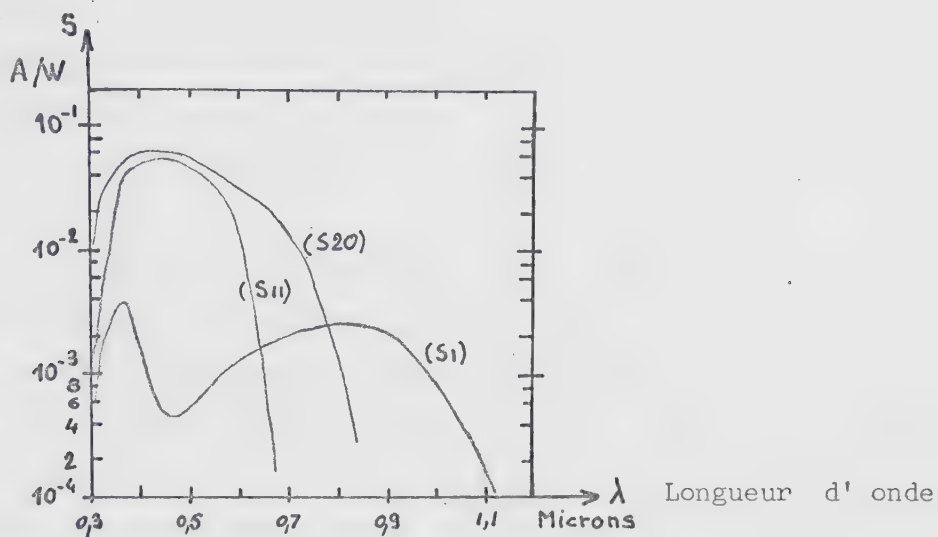


S1 = Photocathode Ag-O-Cs

S11 = Photocathode Sb Cs<sub>3</sub>

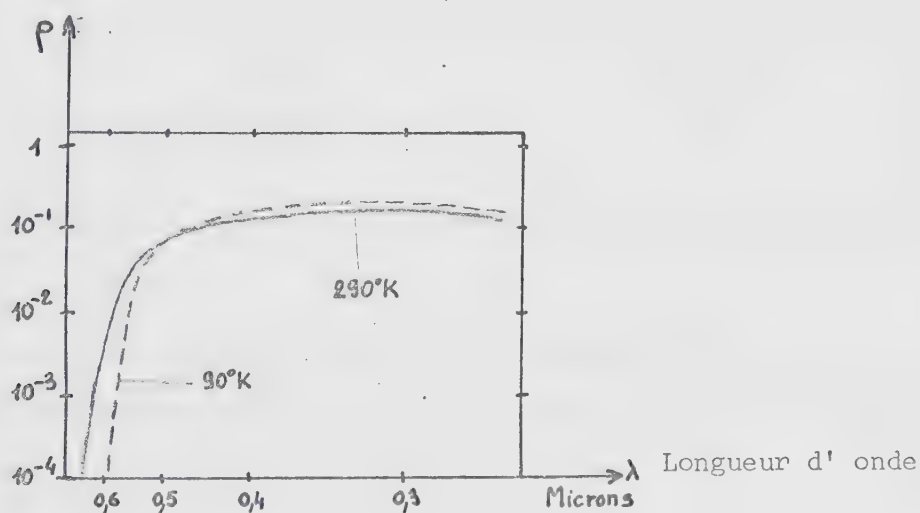
S20 = Photocathode Sb-NaK-Cs

Sensibilité  
ampère/watt



(fig.1) Sensibilité spectrale de quelques photocathodes classiques.

Rendement  
quantique



(fig.2) Variations du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde et de la température pour une S11. [23]



Le noircissement d'une plaque photographique est dû à la réduction de grains Ag Br (contenus dans la gélatine) à l'état d'argent. Les grains d'Ag Br sensibilisés par un électron constituent l'image latente. Cet électron est, soit issu d'un ion Br sous l'action d'un photon absorbé par la plaque photographique, soit émis par un phénomène extérieur à la plaque et directement absorbé. Alors qu'il faut plusieurs photons pour rendre un grain Ag Br développable, il suffit d'un seul électron pour ioniser plusieurs grains d'Ag Br. Cette ionisation libère en outre plusieurs électrons qui peuvent, à leur tour, être capturés par d'autres centres de sensibilité du cristal. On voit donc tout l'avantage du processus électronographique.

Quand l'électron pénètre dans la gélatine, il a une certaine probabilité de rencontrer des grains de bromure d'argent, ces grains formant une trace. Le nombre de traces enregistrées est variable et suit une loi de Poisson, dont écart quadratique moyen est proportionnel à  $\sqrt{e}$  ( $e$  = nombre d'électrons incidents).

Environ 10% des électrons sont réfléchis et absorbés par la gélatine hors des grains Ag Br. Le rendement apparent de la plaque nucléaire est donc de 0,9.

La mesure de la densité de la plaque permet de connaître le nombre d'électrons reçus par la plaque. Pour cela il faut connaître le rendement équivalent de la plaque. Si  $n$  est la valeur moyenne du nombre d'électrons reçus par une surface  $S$  de la plaque, et  $\Delta n$  l'écart quadratique moyen, le rendement équivalent  $e$  de la plaque sera défini par la formule de Rose :

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\sqrt{en}}$$

Si  $D$  est la densité moyenne d'une surface et  $\Delta D$  l'écart type on a

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{\sqrt{en}}$$

Pour les plaques nucléaires, le rendement quantique équivalent dépend du rendement apparent de la plaque et du nombre de grains formant chaque trace.

Le nombre de traces est proportionnel au nombre d'électrons arrivant dans la gélatine. Cette proportionnalité ne dépend pas du temps.

En photographie classique, la loi de réciprocité (densité proportionnelle au produit intensité X temps) est en défaut à température ambiante. Ce défaut n'existe pratiquement plus à basse température ( $-180^{\circ}\text{C}$ ). En photographie nucléaire, la loi de réciprocité est suivie quelle que soit la température, même aux très faibles flux [2].



Une trace pourrait être formée d'un seul grain de bromure d'argent. L'énergie minimum nécessaire à un électron, pour rendre développable un grain de bromure d'argent, est voisine de 20 e.V. à température ambiante. Aux énergies habituelles de travail (plusieurs keV), on peut dire que l'effet électronographique n'a pas de seuil. La trace laissée par un électron est composée en général de plusieurs grains (de 10 à 15) : le nombre de grains est variable suivant l'énergie des électrons [3]

|                        |   |     |
|------------------------|---|-----|
| <u>densité à 25 kV</u> | # | 9,3 |
| densité à 10 kV        |   |     |

Ce nombre de grains, ou sensibilité de la plaque, est variable suivant sa température d'emploi. De la température ambiante à  $-140^{\circ}\text{C}$ , cette sensibilité peut diminuer de moitié.

La sensibilité des plaques nucléaires aux électrons est fortement influencée par le type de révélateur employé. Les résultats des études sur la linéarité de la caractéristique varient suivant les auteurs. On peut dire cependant que la réponse est toujours positive et que, jusqu'à des densités de 6 ou 7, on ne constate pas de phénomène de solarisation. Cette sensibilité est également variable suivant la vieillesse de l'émulsion ou suivant les lots de plaques. Cette variation de sensibilité peut être mesurée par des plaques d'étalonnages, mais il est difficile d'apprécier l'erreur à cause de l'inhomogénéité locale des émulsions.

Pour la caméra électronique, les plaques les plus employées sont les plaques Ilford G5, K5, L4. Ces dernières sont les plus résolvantes et en laboratoire nous avons pu atteindre les 200 dt/mm. A 30 kV, la longueur maximale d'une trace est de  $5\mu$ , de plus la grande majorité des grains se trouve dans une épaisseur de gélatine inférieure à  $1,5\mu$ .

Comme toutes les émulsions photographiques, les plaques nucléaires sont sensibles, pendant leur conservation à la température et à l'hygrométrie : leur augmentation accentue le voile parasite. Elles sont sensibles aux effets de pression qui provoquent une augmentation localisée de densité, ainsi qu'à l'action des rayons cosmiques.

### 2-3 - Association des deux effets :

La chaîne des événements donne, du photon incident, une trace dans la plaque électrographique, par l'intermédiaire de l'électron. On conserve les deux premières propriétés fondamentales du récepteur d'images idéal : absence de seuil et de saturation. Cette cascade d'événements suit une statistique de Poisson.



L'association des deux effets peut introduire des sources de bruits supplémentaires dont nous verrons l'importance ci-dessous (voir 2 - 4). Cette association peut modifier les propriétés secondaires, tels que le rendement quantique et le stigmatisme.

#### Rendement quantique équivalent.

Si  $\epsilon$  est le rendement quantique équivalent de la plaque électrographique, on peut écrire  $\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon} n}$  en supposant le bruit, dû à l'association, négligeable ;  $\rho$  étant le rendement quantique de la photocathode :  $n = n_0 \rho$  ce qui donne :

$$\frac{\Delta n_0}{n_0} = \frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon} \rho n_0} \quad \begin{array}{l} \text{(no relatif aux photons et} \\ \text{n relatif aux électrons )} \end{array}$$

(ce rendement change si on introduit un bruit  $n'$  dû à l'association :  $n = n_0 \rho + n'$ ). Le rendement quantique équivalent de la caméra électronique est égal au produit des rendements quantiques équivalents de la couche et de la plaque.

Ce rendement peut être diminué si la chaîne des événements est rompue à un endroit ou à un autre (par exemple s'il y a diaphragmation du faisceau électronique par une lentille électrostatique).

Selon Bijaoui et Duchesne, le rendement quantique équivalent est une fonction décroissante de la densité. Plus la densité est faible et plus l'efficacité est grande. Mais le rapport signal sur bruit croît avec le nombre d'événements enregistrés, donc avec la densité. Un compromis sera recherché. Ainsi en astronomie, les meilleurs résultats seront obtenus pour une densité de 0,5 à 0,6 pour Ilford G5 [ 4 ]

#### Aberrations chromatiques et géométriques :

L'association d'un point de la couche photoémissive à un point de la plaque nucléaire fait intervenir :

a) - Les aberrations géométriques dues à l'optique électronique, qui dépendent de la forme, de la précision d'usinage, de la précision de montage des lentilles électrostatiques et de la photocathode. A 30 kV, <sup>pour</sup> sa caméra à focalisation électrostatique, Kron indique qu'une ovalisation de 0,0125 mm des lentilles électrostatiques et un décentrage de ces lentilles de 0,025 limiterait la résolution à 100 dt/mm [ 5 ].

b) - Les aberrations chromatiques, liées à l'émission des photo-électrons dont les directions et les vitesses sont différentes, sont diminuées par un accroissement du gradient de potentiel au niveau de la couche. Cependant, il



y a une limite imposée par l'émission de champ.

c) - La courbure de champ provient de la forme des électrodes. Si la cathode et l'anode étaient deux sphères centrées, la surface image serait une sphère ayant même centre. Dans la réalisation pratique, la cathode est une sphère coupée par un cylindre. Ceci provoque une déformation de la surface image. On peut diminuer la courbure de champ qui en résulte en ayant une électrode supplémentaire, et en faisant pénétrer la photocathode dans la cathode. La pénétration idéale est voisine de 1 mm.

#### 2-4 - Bruits dus à l'association :

L'association des effets photoélectrique, et électronographique introduit des bruits parasites.

##### a) - Bruits liés à l'effet photoélectrique :

Les électrons parasites issus de la photocathode peuvent être dus à de la lumière parasite issue du signal ou non. Les rayons lumineux formant l'image d'un objet sur la couche photoémissive peuvent être diffusés par des parois de verre (hublot, support de la couche émissive) ou réfléchis sur des parois métalliques (lentilles électrostatiques). Cette émission parasite est diminuée par des traitements antireflets de surfaces et par des formes appropriées des lentilles électrostatiques. On abaisse alors le taux de lumière diffusée de 21% à 1% [6]. Cette lumière parasite peut également avoir d'autres causes : fluorescence des parois sous l'action de rayons ultra-violet ; effluves dues à la haute tension et vues par la couche photosensible.

La nécessité d'établir des potentiels élevés provoque une ionisation des gaz résiduels de l'enceinte. L'ion positif produit par l'arrachement d'un électron à une molécule, bombarde la photocathode en suivant les lignes de champ et peut provoquer l'émission d'un électron qui ne fait alors pas partie du signal incident. Cette émission provoque sur la plaque une densité parasite dont l'intensité décroît du centre au bord : c'est la tache ionique. La densité de cette tache ionique dépend de la pression régnant dans l'enceinte.

Une couche photoémissive est en général sensible aux agents oxydants. Il a été montré qu'une réaction chimique entre une couche de métal alcalin et de l'oxygène produisait spontanément des électrons : les exoélectrons. Entre le césium et l'oxygène, le rendement de la réaction est faible [7].

##### b) - Bruits liés à l'effet électronographique :

Les plaques nucléaires, bien que peu sensibles aux photons, peuvent avoir un voile parasite dû à la lumière diffusée venant soit de réflexions sur des parois, soit d'effluves, soit de fluorescences. Par contre elles ne



présentent pas de voile chimique.

L'ionisation des gaz résiduels peut également être l'origine d'un bombardement ionique des parois dont les électrons viennent directement sur la plaque nucléaire et provoquent une densité parasite.

### 3 | Performances obtenues avec la caméra électronique Lallemand.

La caméra électronique conçue en 1936 par le Professeur Lallemand emploie des solutions qui permettent d'avoir un couplage des effets photo-électrique et électronographique sans dégradation. On utilise une enceinte où règne un vide poussé, on fabrique la couche émissive hors du récepteur, on refroidit cette couche pendant son utilisation, on soumet les électrons émis à une forte différence de potentiel, on refroidit énergiquement les plaques nucléaires.

#### 3-1 - Description technique : (figure 2 bis)

La caméra électronique est constituée d'une enceinte en verre contenant une optique électronique composée de trois lentilles électrostatiques:

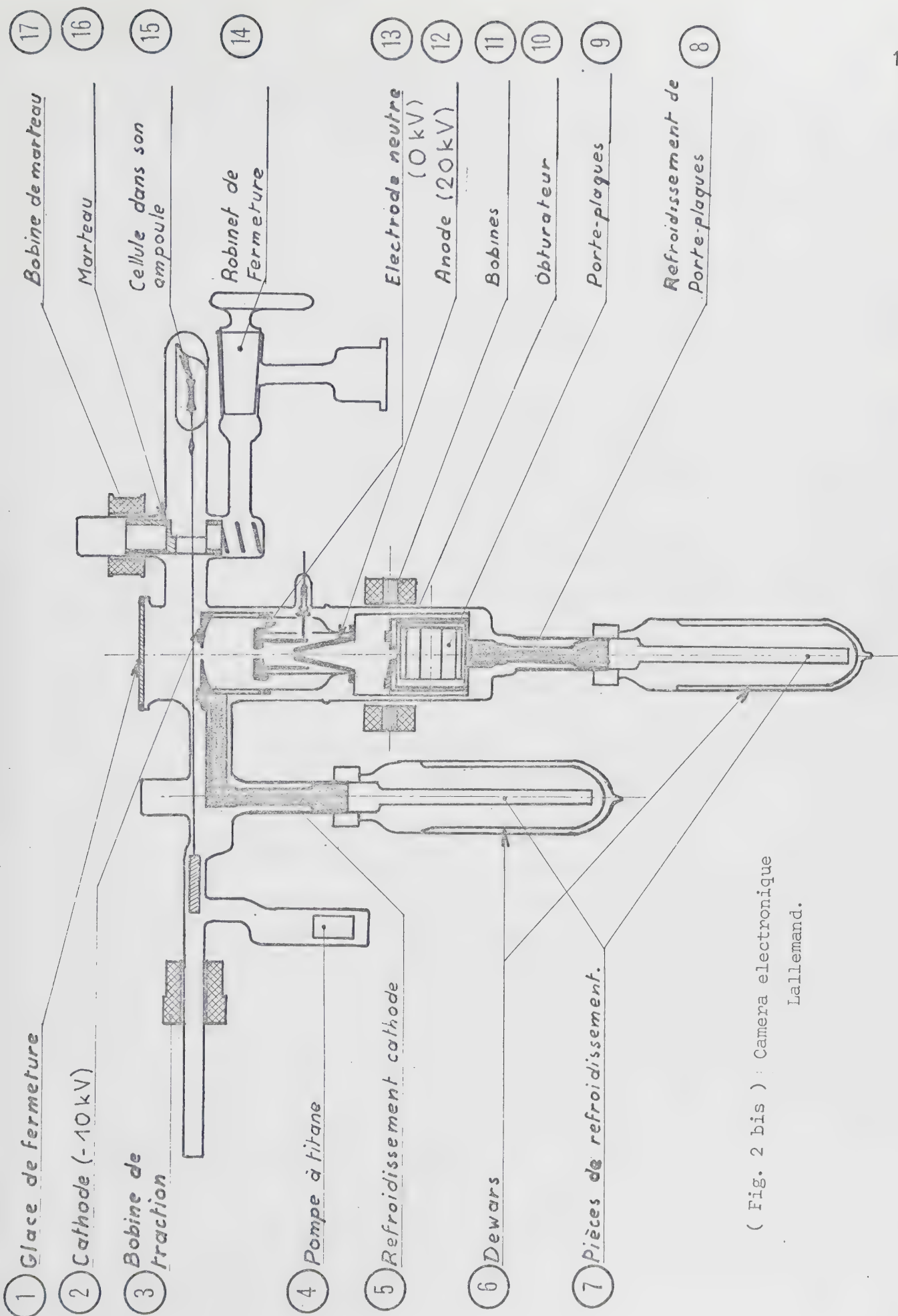
- la cathode (2) sur laquelle sera positionnée la photocathode (15)
- l'électrode neutre (13) (ou champignon)
- l'anode (12) (ou cône) reliée au porte-plaques (9) contenant les plaques nucléaires.

L'enceinte a une forme adaptée au transfert de la photocathode. Les amenées de courant se font par trois passages verre-métal. Le refroidissement de la cathode (5) est assuré par des pièces de refroidissement (7) plongeant dans un cryostat rempli d'azote liquide (6). Il en est de même pour le refroidissement du porte-plaques (8).

Le chargement des plaques nucléaires se fait en sortant l'optique électronique et son porte-plaques par la glace de fermeture (1). Cette ouverture permet aussi d'introduire une ampoule contenant une photocathode dans l'enceinte.

Avant le transfert de la photocathode (15) sur la cathode (2), l'enceinte est vidée par un groupe de pompage relié au robinet (14). Un étuvage de tout l'ensemble, à l'exception de la photocathode et des plaques nucléaires, est nécessaire pendant plusieurs heures afin d'éliminer la vapeur d'eau. Le vide est ensuite amélioré et entretenu, après fermeture du robinet, par refroidissement de la cathode et du porte-plaques, et à l'aide d'une pompe ionique (4). Le charbon actif contenu dans la cathode améliore le cryopompage quand la





( Fig. 2 bis ) : Camera electronique  
Lallemand.



pression résiduelle est assez faible, l'ampoule de verre (15) est brisée au moyen d'un marteau (16) commandé par une bobine magnétique (17). La photocathode est amenée sur la cathode à l'aide d'une tige commandée par une bobine magnétique (3) et plaquée par deux ressorts. Le changement de plaques nucléaires se fait par la rotation d'un barillet commandé par des bobines magnétiques (11). Les bobines commandent également un obturateur (10).

Quand les poses sont effectuées (12 plaques), l'ouverture de la glace (1), pour le développement des plaques nucléaires, entraîne la destruction de la couche photosensible. Une nouvelle préparation est donc nécessaire pour chaque expérience.

### 3-2 - Pressions et température de travail :

Après étuvage à 300°C environ de la caméra sur un groupe de pompage à diffusion de mercure, on refroidit à l'azote liquide les plaques nucléaires pour diminuer leur dégazage, et le charbon actif de la cathode pour favoriser son cryopompage. A cela s'ajoute le pompage ionique, dont il faut interrompre l'action pendant les poses. L'aimant devant être éloigné de l'optique électronique afin de ne pas dégrader les images.

Dans le tube fermé sur lui-même, la température des plaques et de la photocathode est de -160°C, température obtenue au bout de 5 heures pour les plaques [8] [2].

La pression est de  $5 \times 10^{-7}$  torr lue à la pompe ionique ; elle est estimée à  $10^{-8}$  torr dans l'optique électronique [9].

### 3-3 - Seuil à l'enregistrement :

Un photoélectron ayant une énergie suffisante produit une trace caractéristique dans une émulsion nucléaire. Par comptage de traces d'électrons, il est donc possible de détecter une image électronique donnée par un flux de lumière extrêmement faible [10] : l'image d'une mire de Foucault est encore détectable avec 8 traces pour une surface de  $10\,000\mu^2$ . Ceci est obtenu avec une pose de 0,1 seconde sur une plaque Ilford G5. L'énergie des électrons est de 26keV et le grandissement de l'optique électronique égal à 0,8. La photocathode a donc émis  $8 \times 0,8 = 6,4$  électrons pour une surface de  $10\,000\mu^2$  soit  $6,4 \times 10^4$  électrons  $\text{cm}^{-2}$ . Si le rendement de la photocathode est de 0,15, on peut donc détecter moins de  $4 \times 10^5$  photons  $\text{cm}^{-2}$ .

### 3-4 - Bruit de fond :

Il dépend du type d'émulsion, de la tension accélératrice, de la nature et température de la couche photosensible, de la pression régnant dans l'enceinte et de sa propreté.



Le bruit de fond est variable suivant qu'il est étudié en chambre noire ou en cours de pose. En effet, dans ce dernier cas, on introduit des causes de bruit de fond supplémentaire dues à la lumière parasite, et à l'existence d'électrons primaires pouvant provoquer l'émission d'électrons secondaires.

En laboratoire, sur des plaques Ilford G5, l'émission parasite (dans les meilleures conditions) correspond à une densité  $d = 0,01$  pour 1 heure de pose et un potentiel de 20 kilovolts environ [4].

En pose astronomique, sur plaques Ilford G5, une densité  $d = 0,02$  est obtenue pour une pose de 2 à 3 heures avec une tension accélératrice de 25 kV, et une photocathode  $SbCs_3$  d'une sensibilité de 50 à  $70 \mu A / 1m$  [11]. Or, il faut 1 à  $5 \times 10^7$  électrons  $cm^{-2}$  à 25 kV pour obtenir sur une émulsion Ilford G5 une densité de 0,1 [2] ; l'émission parasite est donc de :  $10^3$  électrons  $cm^{-2} s^{-1}$  en pose astronomique.

### 3-5 - Gain de temps de pose à densité donnée :

Pour obtenir une densité donnée, le temps de pose nécessaire est plus court avec la caméra électronique qu'avec une plaque photographique classique. Ce gain en temps de pose dépend du type d'émulsion, de la tension accélératrice, de la longueur d'onde, de la densité, de la durée des poses.

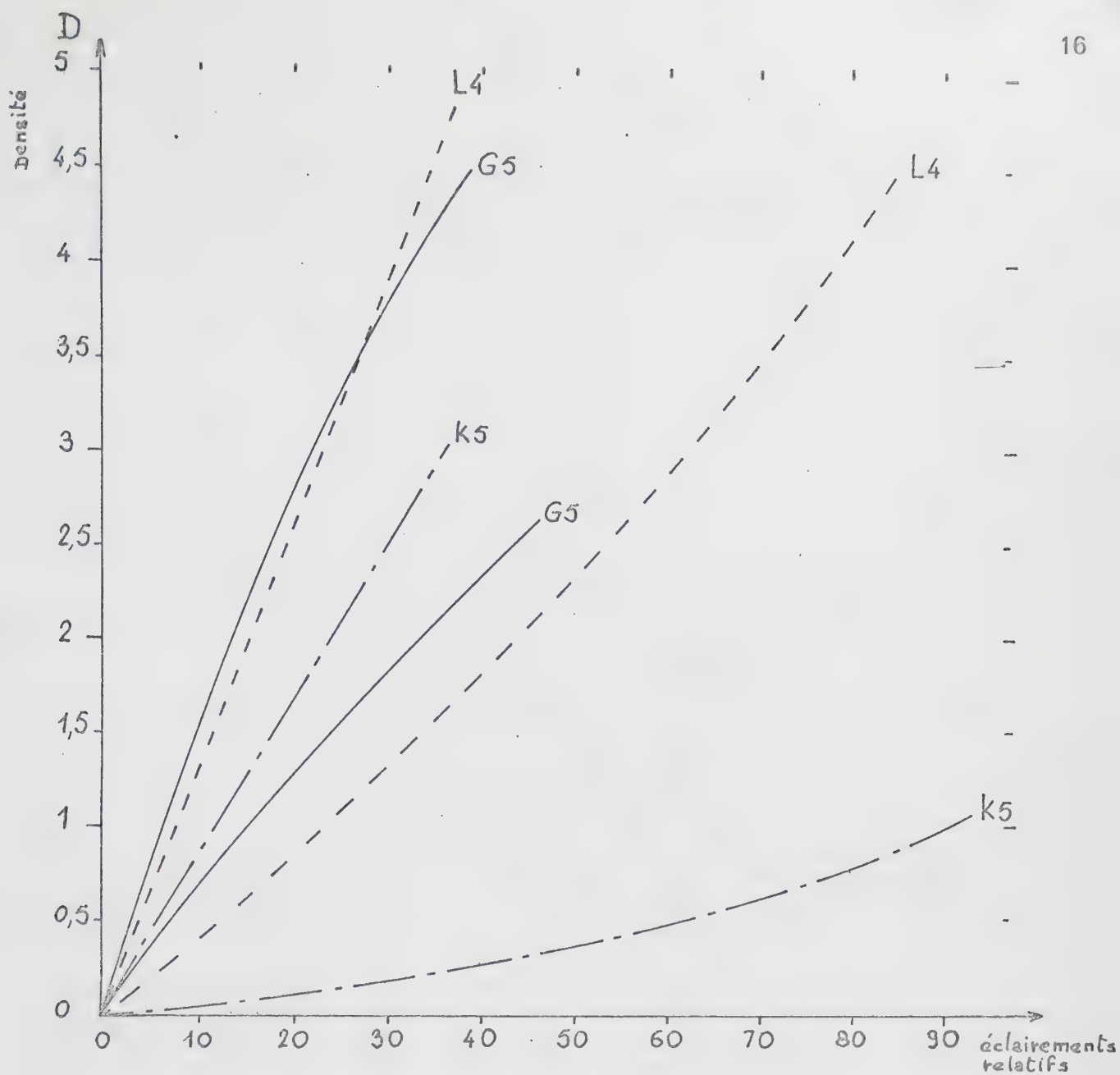
Dans le visible, le gain est de 10 à 100 (figure 3). Dans l'infrarouge pour des densités comprises entre 0,18 et 0,50, le gain est de 50 à 500 par rapport à des plaques 1 N Kodak Rochester [4]. Toutefois, ce gain à densité donnée n'est pas un gain en information. Le gain en information réel permet de gagner 1 à 1,5 magnitude, par rapport à des plaques 103 AO Kodak, pour la détection des magnitudes limites [12].

### 3-6 - Linéarité des plaques : (voir figure 4)

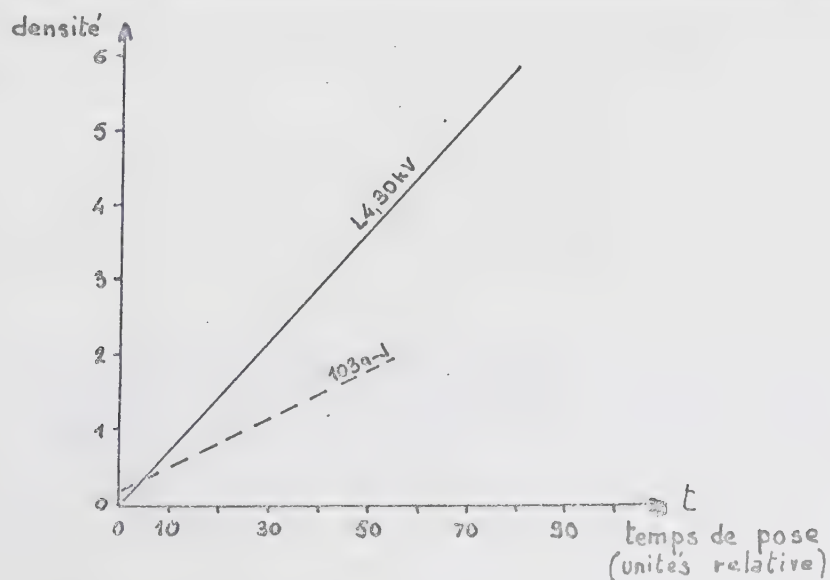
Les résultats sont différents suivant les auteurs. La sensibilité des plaques dépend essentiellement des conditions d'emploi et du mode de développement employé.

Selon Bijaoui et Duchesne [4], les plaques Ilford G5 ont un écart à la linéarité de 2 à 3 % pour une densité de 1,5. La caractéristique de ce type de plaques nucléaires présente une légère concavité négative. Pour les plaques Ilford K5, la concavité est positive. Il arrive que la caractéristique soit parfaitement linéaire. Ceci est également vérifiée pour les plaques L 4, par Kron (figure 5) [13].



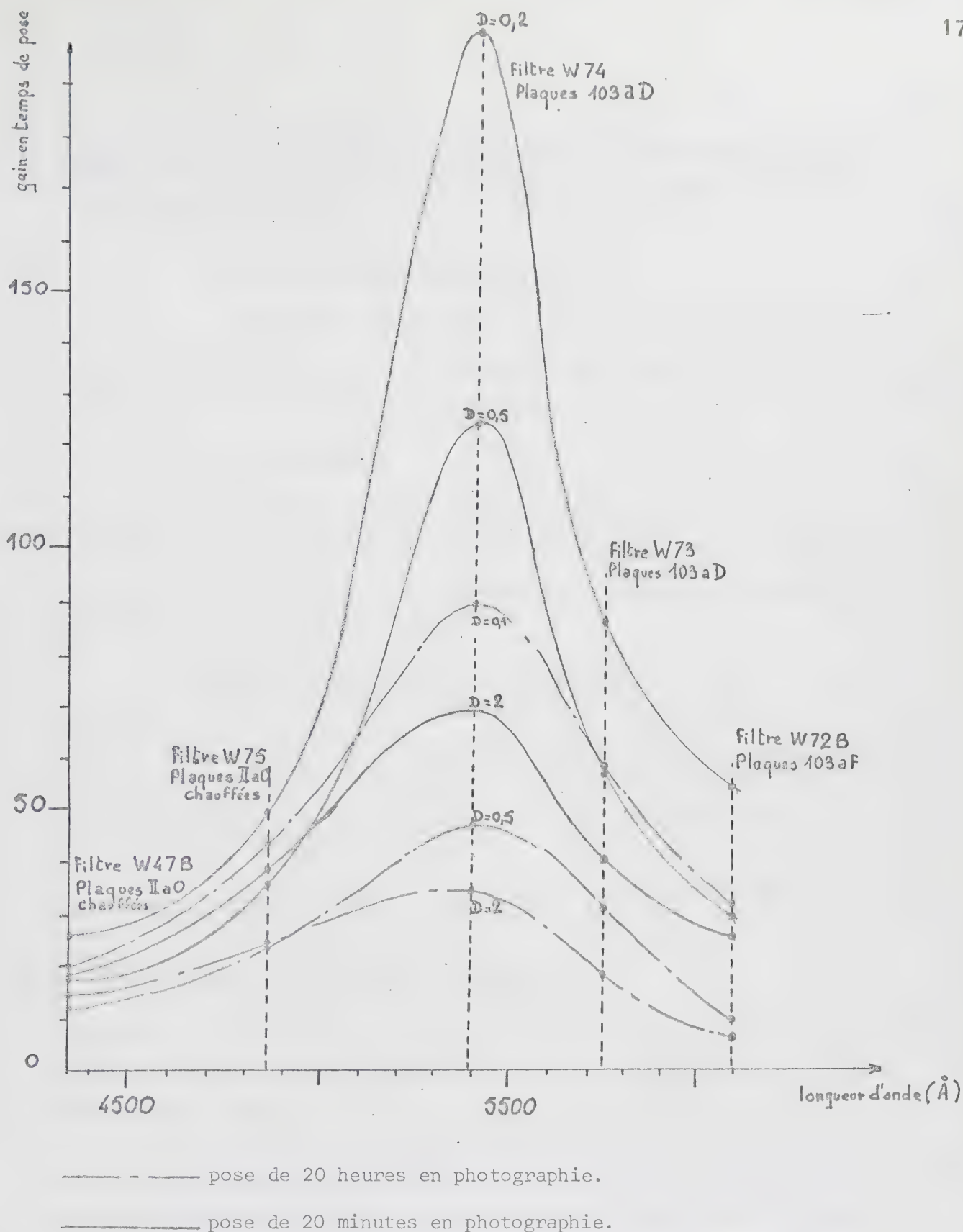


(fig. 4) Courbes caractéristiques pour différents lots de plaques Ilford. [11]



(fig. 5) Courbe caractéristique pour une plaque Ilford L4 . [13]





(fig.3) Gain en temps de pose de la caméra électronique par rapport à la photographie pour 2 temps différents d'exposition. [22]



Sur les courbes de la figure 4, on remarque les importantes différences de sensibilité pour des plaques de même type mais provenant de lots d'émulsions différents.

### 3-7 - Tenue des photocathodes :

Pour des couches  $\text{SbCs}_3$ , la conservation est de plusieurs semaines sans évolution [11]. Les couches infrarouges sont plus sensibles aux agents oxydants et leur conservation est beaucoup plus difficile.

### 3-8 - Résolution :

Avec des photocathodes de diamètre 30 mm, la résolution est de 30 dt/mm. Des essais sont en cours avec des diamètres de 40 et 50mm [11].

La résolution est de 70 dt/mm au centre de la photocathode pour un champ de 3 à 4 mm de diamètre.

### 3-9 - Fiabilité - usages astronomiques :

La caméra électronique est parfaitement au point et est utilisée dans de nombreux observatoires. Sa mise au point est due à Lallemand et Duchesne.

Les résultats énumérés ci-dessus peuvent être obtenus à chaque expérience grâce à une manutention soignée. Avec deux récepteurs, une expérience peut être faite chaque nuit.

Ses qualités en font un instrument de premier choix pour des études de photométrie précise et d'objets faibles.

## | | | |---|----------------------------------------------| | 4 | Limites d'utilisation de la caméra Lallemand | |---|----------------------------------------------|

L'utilisation de la caméra Lallemand est facile dans des lieux habituels de travail (laboratoires, observatoires). Elle devient difficile, voire impossible dans des conditions d'emploi inhabituelles (Observatoires de haute-montagne, missions d'environnement malaisé, nacelle de ballon).

La baisse de pression due à l'altitude et l'hygrométrie de l'air ambiant augmentent les difficultés de maintien de potentiels élevés avec une bonne stabilité. De plus, dans une nacelle de ballon son utilisation est impossible en raison de sa fragilité, de son encombrement et de sa faible autonomie.

Sur des lieux d'observations inhabituels, lors d'observations d'éclipses solaires par exemple, les conditions d'environnement (transports, poussières, etc...) ne sont pas très favorables à l'emploi de cette caméra électronique.



Ces difficultés d'utilisation proviennent de la technologie employée, non adaptée à ces nouvelles conditions. Celles-ci font apparaître les points faibles : maintien de la haute tension, fragilité, autonomie, commande de mouvements mécaniques.

#### 4-1 - Maintien de la haute tension :

L'anode de l'optique électronique est à un potentiel voisin de 25 kV. Pour les essais de haute tension, et pour former les électrodes, il est intéressant d'obtenir une valeur voisine de 40 kV. Les amenées de tension se faisant par des passages verre-métal en contact avec l'air ambiant, le risque d'effluves est loin d'être négligeable. Pour diminuer cet effet, le raccordement des fils se fait par l'intermédiaire de boules métalliques de gros diamètres, et le corps de la caméra est entouré d'une chemise à l'intérieur de laquelle on souffle de l'air chaud. Ceci est insuffisant si la pression ambiante descend à quelques mmHg et si de la vapeur d'eau ou des poussières se déposent sur le corps de l'enceinte. Il en résulte que l'écoulement des charges se fait irrégulièrement, modifiant ainsi le rapport de haute tension, entraînant alors des effluves et des défauts de mise au point. Il faudrait donc éviter que la haute tension "baigne" dans l'air ambiant.

#### 4-2 - Fragilité :

L'emploi de verre, de soudure verre-métal, et la forme imposée par les conditions d'utilisation (transfert de photocathodes), font de la caméra un appareil difficile à manier. Le transport ne se fait pas sans danger de casse. Quand cela se produit, la réparation nécessite un arrêt important car il y a peu d'éléments démontables. Cette fragilité est incompatible avec l'emploi en ballon : les secousses y sont importantes et l'atterrissage violent.

Dans l'optique électronique les liaisons conducteur-isolants sont réalisées par des soudures verre-métal. Les différentes pièces sont emboîtées et centrées par des vis. L'ensemble est fragile et permet difficilement d'obtenir un centrage parfait des trois lentilles électrostatiques. Il faudrait donc avoir un ensemble plus rigide, facilement démontable et plus compact.

#### 4-3 - Autonomie :

Le refroidissement de la cathode (photocathode et charbon actif) et de l'anode (plaques nucléaires) se fait par conduction. Les pertes thermiques sont élevées et le remplissage des cryostats en azote liquide doit se faire toutes les heures. Le remplissage périodique, parfois difficile en poses astronomiques devient impossible en ballon.



|   |                                           |
|---|-------------------------------------------|
| 5 | Autres modèles de caméras électroniques : |
|---|-------------------------------------------|

Kron aux Etats-Unis et Mac Gee en Angleterre ont développé d'autres modèles de caméras électronographiques.

#### 5-1 - Caméra électronique de Kron : [13]

C'est une caméra électronique à focalisation électrostatique associant directement l'effet photoélectrique et l'effet électronographique.

Les différences essentielles par rapport à la caméra Lallemand sont :

- fabrication de la couche photoémissive dans la caméra, et non à l'extérieur du tube.
- interposition d'une vanne à joint métallique entre la couche sensible et les plaques nucléaires permettant la conservation de la sensibilité de la couche lors du changement des plaques nucléaires.
- photocathode non refroidie.

Les performances sont les suivantes :

- bruit de fond : densité de 0,002 sur Ilford L4 en une heure dans le noir complet à 30 keV. Le bruit de fond est plus important en pose. Il serait dû à de la lumière diffusée. Il est certain que le fait de fabriquer la couche dans le tube doit être la cause de ce bruit de fond.
- sensibilité de la photocathode Sb-Cs<sub>3</sub>: rendement quantique de 10% à 4 200 Å.

L'avantage essentiel est la conservation de la couche photosensible pendant au moins une année. Cependant, la fabrication de la couche dans le tube, l'absence de refroidissement de la photocathode, et l'obligation de pomper en permanence dans le sas de la vanne sont les défauts principaux de ce tube. Il ne permet pas encore d'utiliser de photocathode infrarouge.

#### 5-2 - Spectracon de Mac Gee [14] :

C'est une caméra à focalisation magnétique. La photocathode est fabriquée dans un tube auxiliaire puis introduite dans le récepteur. L'optique électronique contenant la photocathode est isolée du film nucléaire par une feuille de mica. Cette feuille de 4 microns d'épaisseur arrête 25% des électrons quand leur énergie est de 40 keV.

La tenue en sensibilité de la photocathode est bonne pour les S11 et les S20, mais le transfert d'une photocathode S1 entraîne une diminution égale au tiers de la valeur origine.

Le bruit de fond correspond à une densité de 0,1 en 10 heures d'exposition sur film XM (ce qui serait équivalent à une pose de 50 heures sur Ilford G5). Ce bruit de fond, obtenu quand la température de la photocathode est de 0°C, est 10 fois plus important quand la température est de 15°C.



- La résolution est de 80 dt/mm dans un champ de 25 mm de diamètre.

L'emploi d'une bobine magnétique nécessite un refroidissement peu pratique par un courant d'eau. Un refroidissement est également nécessaire pour la photocathode.

L'avantage essentiel est la conservation de la couche photosensible aussi longtemps que la fenêtre de mica n'est pas détériorée.

Le faible refroidissement de la photocathode et la perte d'électrons lors de la traversée de la fenêtre de mica sont sans doute à l'origine du bruit de fond résiduel, qui est 6 fois plus important que celui de la caméra électronique Lallemand [21].

### 5-3 - Conclusion.

Ces deux types de caméra sont d'une mise en oeuvre plus aisée que la caméra électronique Lallemand, mais leur bruit de fond reste un peu plus important. Enfin, elles ne sont guère plus utilisables dans les conditions d'emploi inhabituelles que nous avons évoquées ci-dessus.

Il semble donc intéressant de développer une caméra électronique Lallemand en conservant toutes ses qualités, mais qui soit utilisable dans un environnement plus difficile.



## II - CONDITIONS DE REALISATION D'UNE CAMERA DU TYPE LALLEMAND

- 1 - Conservation de la sensibilité de la couche photoémissive.
  - 1-1 - Action des gaz sur les métaux alcalins
  - 1-2 - Origine des gaz résiduels
- 2 - Obtention de très basses pressions.
  - 2-1 - Etanchéité d'une enceinte
    - 2-1-1- Liaisons permanentes
    - 2-1-2- Liaisons démontables
    - 2-1-3- Vannes
  - 2-2 - Dégazage d'une enceinte
    - 2-2-1- Influence de l'air ambiant
    - 2-2-2- Dégazage des matériaux
  - 2-3 - Mode de pompage
    - 2-3-1- Pompage par diffusion
    - 2-3-2- Pompage par fixation
  - 2-4 - Qualité du pompage
  - 2-5 - Conclusion
- 3 - Conditions de maintien de haute tension.
  - 3-1 - Influence sur le bruit de fond.
    - 3-1-1- Rôle de la pression
    - 3-1-2- Rôle du gradient de tension
    - 3-1-3- Rôle de la forme et de l'état de surface des électrodes.
    - 3-1-4- Forme des électrodes, carte des équipotentiellles
  - 3-2 - Qualité des images
  - 3-3 - Conclusion
- 4 - Obtention de basses températures
  - 4-1 - Influence sur l'émission thermoélectronique
  - 4-2 - Autonomie en liquide cryogénique
  - 4-3 - Conclusion
- 5 - Mécanismes - solidité.



## II - CONDITIONS DE REALISATIONS D'UNE CAMERA DU TYPE LALLEMAND

Les avantages de la caméra électronique Lallemand sont tels qu'il apparaissait intéressant d'employer une nouvelle technique pour élargir son domaine d'utilisation.

Nous examinerons les paramètres qui interviennent dans la réalisation d'une caméra de type Lallemand, et nous essaierons d'utiliser les derniers progrès de la technologie. Nous verrons comment intervient la qualité du vide, régnant dans l'enceinte de la caméra, sur la conservation de la sensibilité de la couche. Ceci nous permettra de définir le mode de pompage et les matériaux les mieux adaptés. Nous verrons également comment conserver les qualités respectives des effets, photoélectrique et électronographique dans leur association.

Nous définirons alors les conditions relatives au maintien de tension, et de la température de travail. Enfin nous profiterons de la nouvelle technologie pour augmenter l'autonomie de la caméra, en réduisant les pertes thermiques. Ceci nous permettra également d'obtenir un ensemble plus solide.



## II

## 1. Conservation de la sensibilité de la couche photoémissive

Une des fonctions du récepteur est de conserver la tenue en sensibilité de la couche photoémissive à sa valeur de fabrication. Pour diminuer le bruit de fond de la caméra, la couche photo-sensible est fabriquée indépendamment dans une petite enceinte en verre. Pour l'utilisation du récepteur, la photocathode est extraite de cette enceinte, et positionnée sur la cathode de la caméra. Pendant cette opération de transfert, la couche photoémissive doit conserver sa sensibilité. Sensibilité qu'il faut également conserver quand la photocathode est en place sur la cathode.

Des expériences ont montré qu'une oxydation de la couche entraînait une baisse irréversible de la sensibilité jusqu'à son annulation. D'autre part, cette oxydation entraînerait une émission d'exoélectrons (réaction  $O_2 - Cs$ ), ce qui augmenterait le bruit de fond du récepteur.

## 1-1- Action des gaz sur les métaux alcalins

Diverses expériences montrent que les métaux alcalins sont très sensibles aux agents oxydants, en particulier  $H_2O$ ,  $OH$  et  $O_2$ .

## a/ Expérience de Doucet-Truc-Richard [15]

Dans une enceinte préalablement étuvée, où règne une pression de  $10^{-8}$  torr, l'introduction de vapeur de Cs à température ambiante montre, à l'analyseur de gaz, une réduction du pic  $H_2O$  et  $OH$  d'un facteur 100, et une réduction du pic de  $O_2$  d'un facteur supérieur à 10. Les autres éléments ne semblent pas affectés.

## b/ Expérience de Decker [16].

Decker fait agir, sur une couche trialkaline S 20, différents gaz. La couche se trouve dans une enceinte préalablement étuvée, dans laquelle est établie une pression de  $10^{-9}$  torr. Il introduit un gaz, et note sa pression partielle au moment où la couche accuse une baisse de sensibilité. Il obtient les valeurs suivantes :

|        |                    |                    |      |
|--------|--------------------|--------------------|------|
| $H_2O$ | pression partielle | $2 \times 10^{-7}$ | torr |
| $O_2$  | "                  | $5 \times 10^{-6}$ | "    |
| CO     | "                  | $5 \times 10^{-5}$ | "    |
| $CH_4$ | "                  | $1 \times 10^{-4}$ | "    |
| $N_2$  | "                  | $2 \times 10^{-4}$ | "    |
| $H_2$  | "                  | $2 \times 10^{-4}$ | "    |



Ici, également,  $H_2O$  et  $O_2$  ont une action plus rapide que les autres gaz. Decker signale que l'action de l'eau est irréversible, tandis que celle de l'oxygène l'est un peu moins.

Il en résulte que, dans la caméra électronique, lors du transfert de la photocathode et pendant son utilisation, les gaz qu'il faudra particulièrement éliminer sont  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$ . En général, la vitesse de réaction chimique diminue avec la température. On aura donc intérêt à refroidir la couche sensible de façon à ce que l'action éventuelle des gaz résiduels se fasse très lentement.

### 1-2- Origine des gaz résiduels

Dans la caméra le dégazage provient de la gelatine des plaques nucléaires qui a un pourcentage d'eau élevé. Par ailleurs les constituants de l'enceinte desorbent principalement  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  et  $CO$ . Il faut donc adapter un mode de préparation et de fonctionnement de la caméra électronique qui abaisse la tension de vapeur de ces différents gaz jusqu'à une valeur très faible.

## | | | |---|-------------------------------------| | 2 | Obtention de très basses pressions. | |---|-------------------------------------|

L'enceinte de la caméra est le siège d'une pression très basse (quelques  $10^{-9}$  torr). Cette valeur est nécessaire pour conserver la sensibilité de la photocathode et éliminer le bruit de fond.

Dans une installation ultra vide, la pression est limitée par deux facteurs : fuite entre l'enceinte et l'atmosphère, et dégazage des matériaux constituant l'enceinte. Nous allons voir comment obtenir l'étanchéité d'un ensemble ultra-vide, comment réduire le dégazage de ses constituants, et quel est le mode de pompage le mieux adapté.

### 2-1- Etanchéité d'une enceinte

L'étanchéité se mesure par le flux de gaz qui passe entre l'intérieur et l'extérieur d'une enceinte. Une fuite ayant un débit de  $10^{-12}$  torr. $\cdot$  $1.s^{-1}$ , correspondant à la sensibilité des meilleurs détecteurs de fuite, du type spectrographe de masse à hélium ne limite pas, en pratique, les performances. Les fuites se trouvent principalement aux liaisons des différents éléments constituant une enceinte. Les liaisons sont de deux types : permanentes et démontables.

#### 2-1-1- Liaisons permanentes

Ce sont des liaisons qui sont obtenues en cours de fabrication.

Dans les enceintes en verre, ce sont les soudures verre-verre et verre-métal qui permettent d'obtenir la forme désirée. Elles sont fiables et



couramment utilisées, mais leur fragilité et leur manque de tenue à haute température en limite l'utilisation.

Dans les enceintes métalliques, la soudure à l'arc sous atmosphère d'argon est utilisée pour les liaisons inox-inox, cuivre-cuivre, inox-cuivre et argent-inox. Quand ce mode de liaison ne convient pas, (métal-isolant, inox-aluminium) on a recours à des brasures à haut point de fusion (780° C) pour obtenir l'étanchéité, entre 4°K et 500° C. L'usinage d'ensembles brasés permet d'obtenir des centrages rigoureux et des cotes précises.

2-1-2- Liaisons démontables

Ce type de liaisons permet d'accoupler différents éléments d'une enceinte. Leur démontabilité, qui peut être fréquente, doit être facile.

Dans une enceinte en verre, pour assurer l'étanchéité de deux éléments, on emploie généralement des rodages de verre graissés, des mastics à bas point de fusion (piceine), ou des joints toriques en matériaux synthétiques. Du fait de leur forte tension de vapeur à température modérée, leur emploi est limité. Il est donc délicat de les utiliser dans des ensembles qui doivent être étuvés. Avec certaines précautions, des graisses peuvent être utilisées à basse température, mais là, l'utilisation est très difficile.

Si l'on veut employer des installations démontables et résistant à une grande gamme de température, de 4° K à 450° C, soit près de 700 degrés, l'emploi de joints métalliques est nécessaire. Différents essais effectués dans notre laboratoire ont donné les résultats groupés dans le tableau suivant :

| Température | - 269° C                 | - 196° C                 | + 140° C | + 250° C | + 450° C |
|-------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|
| Point       | 4° K<br>(Helium liquide) | 77° K<br>(Azote liquide) |          |          |          |
| Cuivre      |                          |                          |          |          |          |
| Aluminium   |                          |                          |          |          |          |
| Or          |                          |                          |          |          |          |
| Plomb       |                          |                          |          |          |          |
| Indium      |                          |                          |          |          |          |



Remarques :

- les flèches en trait plein correspondent à des essais effectués dans notre laboratoire.
- les flèches en pointillés correspondent à des valeurs relevées dans la littérature.

L'étanchéité s'obtient en écrasant le joint entre deux brides métalliques dont le profil est adapté à la forme du joint. Quand celui-ci est employé en fil de quelques dixièmes de millimètre de diamètre, (0,5 à 1,5mm), il est écrasé entre deux surfaces planes ou entre deux coins: en particulier pour des fils de plomb, d'indium ou d'or. Les joints en cuivre et en aluminium ont, de préférence, la forme de couronnes minces, et sont écrasés entre deux brides ayant un profil de couteaux. (Exemple : Conflat Varian).

Le choix de la nature et de la forme d'un joint sera faite en fonction de sa température d'utilisation. Dans la construction d'un appareil, il faudra tenir compte de la force de serrage qui sera différente suivant la solution adoptée.

Tableau de la dureté relative pour quelques matériaux :

| - Nature du joint | Cuivre  | Or      | Plomb | Indium |
|-------------------|---------|---------|-------|--------|
| Dureté relative   | 2,5 à 3 | 2,5 à 3 | 1,5   | 1,2    |

Exemple : pour réduire un joint or de 0,5 mm de diamètre, à une épaisseur de 0,2mm, il faut exercer une force de 280 kg par centimètre de diamètre.

### 2-1-3- Vannes

La liaison entre un groupe de pompage et une enceinte ultra vide peut être effectuée par une vanne dont la fermeture assure l'étanchéité et l'indépendance de cette enceinte. Dans certains cas, la vanne peut être remplacée par un queusot.

- La vanne : La vanne à rodages de verre graissés, ou à joints élastomères, couramment employée en laboratoire, a les inconvénients cités ci-dessus (dégazage, tenue à la température) : son utilisation est donc limitée. La vanne métallique peut être utilisée dans une gamme importante de température. Le dégazage produit lors de son fonctionnement est pratiquement inexistant.

- Le queusot : Dans une technologie utilisant le verre, le queusot est obtenu par fusion. C'est une opération délicate demandant un certain apprentissage. Le queusot métallique est obtenu par sertissage : il est dû à l'écrasement d'un tube (cuivre recuit en général) à température ambiante au moyen d'une pince. Ce sertissage est facile à obtenir.



- Cas particulier du queusot métallique : si le tube a une section suffisante, pour y permettre le passage d'un échantillon, il peut servir de tunnel d'introduction à cet échantillon. Une fois cette opération effectuée, son sertissage fermera l'enceinte.

Son avantage sur une vanne métallique à passage direct offrant la même section de passage est le gain sur le poids et l'encombrement.

## 2-2- Dégazage d'une enceinte

Les gaz contenus dans une enceinte proviennent de deux sources : de l'air ambiant et du dégazage des matériaux.

### 2-2-1- Composition de l'air ambiant

La composition de l'atmosphère d'un laboratoire est en général voisine des valeurs suivantes :

|                |                      |      |                           |
|----------------|----------------------|------|---------------------------|
| Azote          | $6 \times 10^2$      | torr | } Pressions<br>partielles |
| Oxygène        | 1,6                  | "    |                           |
| Argon          | 7                    | "    |                           |
| Gaz carbonique | $2,5 \times 10^{-1}$ | "    |                           |
| Néon           | $1,8 \times 10^{-2}$ | "    |                           |
| Helium         | $4 \times 10^{-3}$   | "    |                           |
| Krypton        | $8,4 \times 10^{-4}$ | "    |                           |
| Hydrogène      | $3,8 \times 10^{-4}$ | "    |                           |

La somme de ces différentes pressions partielles de gaz donne la pression atmosphérique (760 torr). Si on suppose que l'on pompe une enceinte, avec une vitesse de pompage égale pour chaque gaz, à une pression de  $10^{-6}$  torr, on diminuera la pression partielle de ces mêmes gaz d'un facteur  $10^6$ . Cette composition peut varier suivant le lieu ou les différentes manipulations se font, du fait d'éventuels polluants, (fumées, vapeur d'eau par exemple).

### 2-2-2- Dégazage des matériaux

Quand un solide est en présence d'un gaz, il capture les molécules de la phase gazeuse. Celles qui restent à la surface du solide subissent le phénomène d'adsorption, celles qui pénètrent dans le solide subissent le phénomène d'absorption. L'équilibre qui s'établit entre le gaz et le solide est fonction de la pression au contact de la surface et de la température. Une surface subissant une dépression ou une élévation de température émet des gaz : c'est la désorption.

Cette désorption dépend de la nature de l'état de surface et de la pression, mais en dessous de  $10^{-5}$  torr, l'influence de celle-ci est négligeable. Le dégazage varie suivant le matériau constitutif, et suivant les



produits utilisés lors de sa fabrication. Ainsi, le verre désorbe surtout H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> tandis que l'acier inoxydable désorbe essentiellement H<sub>2</sub>.

Le nettoyage des différents éléments modifie leur dégazage. Actuellement, il semble que les meilleurs résultats soient obtenus par microbillage, de préférence au nettoyage chimique et au nettoyage électrolytique.

- Valeurs de dégazage pour certains matériaux (en torr.l.s<sup>-1</sup>)

| Temps de dégazage<br>Matériaux                  |                      |                      |                       |                       |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                 | 30 mn                | 1 heure              | 10 h                  | 100 h                 |
| -Acier inoxydable<br>(poli électroly-<br>tique) | 5 x 10 <sup>-8</sup> | 2 x 10 <sup>-8</sup> | 2 x 10 <sup>-9</sup>  | 2 x 10 <sup>-10</sup> |
| -Acier inoxydable<br>(microbillé)               |                      | 4 x 10 <sup>-9</sup> | 1 x 10 <sup>-10</sup> | 1 x 10 <sup>-11</sup> |
| -Cuivre<br>(poli électroly-<br>tique)           | 1 x 10 <sup>-7</sup> | 2 x 10 <sup>-8</sup> | 1 x 10 <sup>-9</sup>  | 1 x 10 <sup>-10</sup> |
| -Céramique                                      | 5 x 10 <sup>-7</sup> | 1 x 10 <sup>-7</sup> | 1 x 10 <sup>-8</sup>  |                       |
| - Pyrex                                         | 2 x 10 <sup>-8</sup> | 7 x 10 <sup>-9</sup> | 6 x 10 <sup>-10</sup> |                       |

L'influence la plus nette est celle de la température :

Le dégazage est lié à l'énergie de fixation des particules et est modifié par un changement de température. Le taux de dégazage suit une loi exponentielle de la forme

$$\frac{dN_a}{dt} = \frac{N_a}{\tau_0} e^{-E_a/RT}$$

- N<sub>a</sub> = nombre de particules fixées
- τ<sub>0</sub> = constante de temps
- E<sub>a</sub> = énergie d'activation de désorption
- R = Constante des gaz parfaits
- T = température absolue.

Une augmentation de la température T provoquera une augmentation du dégazage. Si l'on veut obtenir un vide poussé, il est nécessaire de chauffer l'enceinte à une température élevée, le retour à température ambiante provoquant une baisse de pression. A fortiori, un refroidissement des parois de l'enceinte accentuera encore ce phénomène. Pour avoir un ordre de grandeur :



considère que le taux de dégazage diminue d'un facteur 10 après retour à température ambiante, quand l'élévation de température est multiple de 100°C.

L'énergie de fixation varie suivant la nature des particules. L'étuvage et le refroidissement auront pour but de modifier la composition des gaz résiduels d'une enceinte. Ceci est particulièrement sensible pour la vapeur d'eau. Ainsi dans la caméra électronique, les parois du récepteur sont étuvées puis ramenées à température ambiante, tandis que les plaques nucléaires qui ne peuvent être chauffées, seront refroidies.

### 2-3- Mode de pompage

Pour abaisser la pression dans une enceinte, plusieurs modes de pompage peuvent être utilisés. La pression limite dépend du dégazage de l'enceinte et du dégazage résiduel propre au mode de pompage employé.

#### 2-3-1- Pompage à diffusion

Le mode de pompage le plus ancien et le plus répandu, en particulier pour la caméra électronique, utilise la pompe à diffusion d'huile ou de mercure. Le principe de ce pompage est basé sur le fractionnement d'un fluide (huile ou mercure) par chauffage. Les molécules du fluide moteur sont émises vers une paroi refroidie, sur laquelle elles se condensent. Dans leur parcours, elles entraînent les molécules de gaz de l'enceinte à vider, en établissant ainsi un gradient de pression. Une pompe à palettes permet de résorber le dégazage provenant du fluide de la pompe à diffusion, chauffé à 150°C. En amont de la pompe, un piège refroidi en général à l'azote liquide, est nécessaire pour améliorer la pression en évitant une contamination de l'enceinte à vider. Cependant, à la longue, la retrodiffusion des hydrocarbures ou des vapeurs de mercure est difficilement évitable. L'emploi de ces pompes nécessite un système de refroidissement à eau, qui peut être difficilement réalisable en mission d'environnement difficile. Ce type de pompe peut également se refroidir par une ventilation d'air, mais alors, le vide obtenu est moins poussé.

La qualité du vide peut être encore améliorée en interposant, soit entre la pompe à palettes et la pompe à diffusion, soit entre la pompe à diffusion et l'enceinte à vide, des pièces à sorption. Ce type de pompage évacue pratiquement tous les gaz à la même vitesse.

#### 2-3-2- Pompage par fixation

##### a) Pompage ionique

Dans ce mode de pompage, les molécules de gaz sont ionisées par une forte différence de potentiel. Les électrons, dont le trajet est allongé par un champ magnétique, produisent des ions qui bombardent une cathode en titane. Une partie pénètre dans le métal, l'autre y libère des



atomes qui viennent se déposer sur l'anode où ils fixent les gaz. Un prévidage est nécessaire pour l'amorçage de cette pompe. Une fois amorcée, le pompage primaire est désolidarisé. Le pompage par fixation provoque, à la longue, une saturation ; un étuvage de régénération est donc nécessaire. La pression obtenue est inférieure à  $10^{-10}$  torr. L'avantage est de ne pas employer de fluide moteur, ce qui ne contamine pas l'enceinte. Il peut également servir à la détection de fuite en remarquant que sa vitesse de pompage est différente suivant les gaz tels que  $O_2$ , He. Ce mode de pompage est sensible aux agents contaminants.

L'efficacité de ce pompage est grande pour  $H_2$ , elle décroît pour  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ , He, Ar.

#### b) Pompage par sorption

Le pompage cryogénique condense les gaz sur une paroi froide, ce qui crée une dépression dans l'enceinte. Il est nécessaire de prévider pour éviter d'avoir un condensat trop important, qui pourrait limiter la pression finale. A température de l'azote liquide (77°K) on peut atteindre une pression de  $10^{-9}$  torr sur une enceinte ayant été étuvée. En utilisant une cryopompe à l'hélium liquide (4°K) le vide limite peut être amélioré d'un facteur 100. Cet effet cryogénique est plus important si on emploie du charbon actif, ou des zéolithes, dont la propriété principale est de fixer les molécules gazeuses. Leur surface spécifique est très grande, de l'ordre de  $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

On obtient alors une bonne vitesse de pompage pour  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ . La vitesse de pompage sera d'autant plus grande que les échanges thermiques seront meilleurs.

Le pompage cryogénique a l'avantage de ne pas contaminer l'enceinte. Son fonctionnement ne dépend que de l'autonomie en liquide cryogénique, et n'utilise pas d'énergie extérieure.

#### c) Remarques

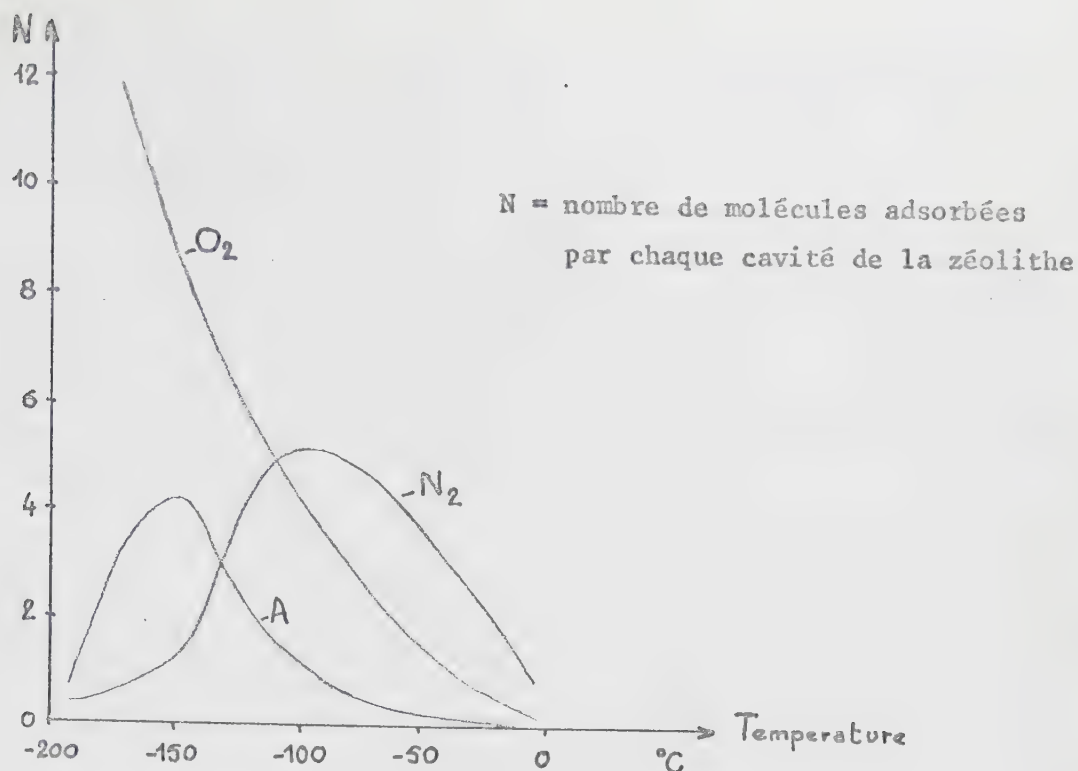
\* Courbe d'adsorption de la zéolithe 5 A. [17] (figure 6)

Le diamètre moyen des pores est de 5Å. Le nombre de molécules adsorbées varie avec la température. En effet, le diamètre des pores se rétrécit, ce qui gêne l'adsorption des molécules d'azote et d'argon, mais permet toujours celles de l'oxygène.

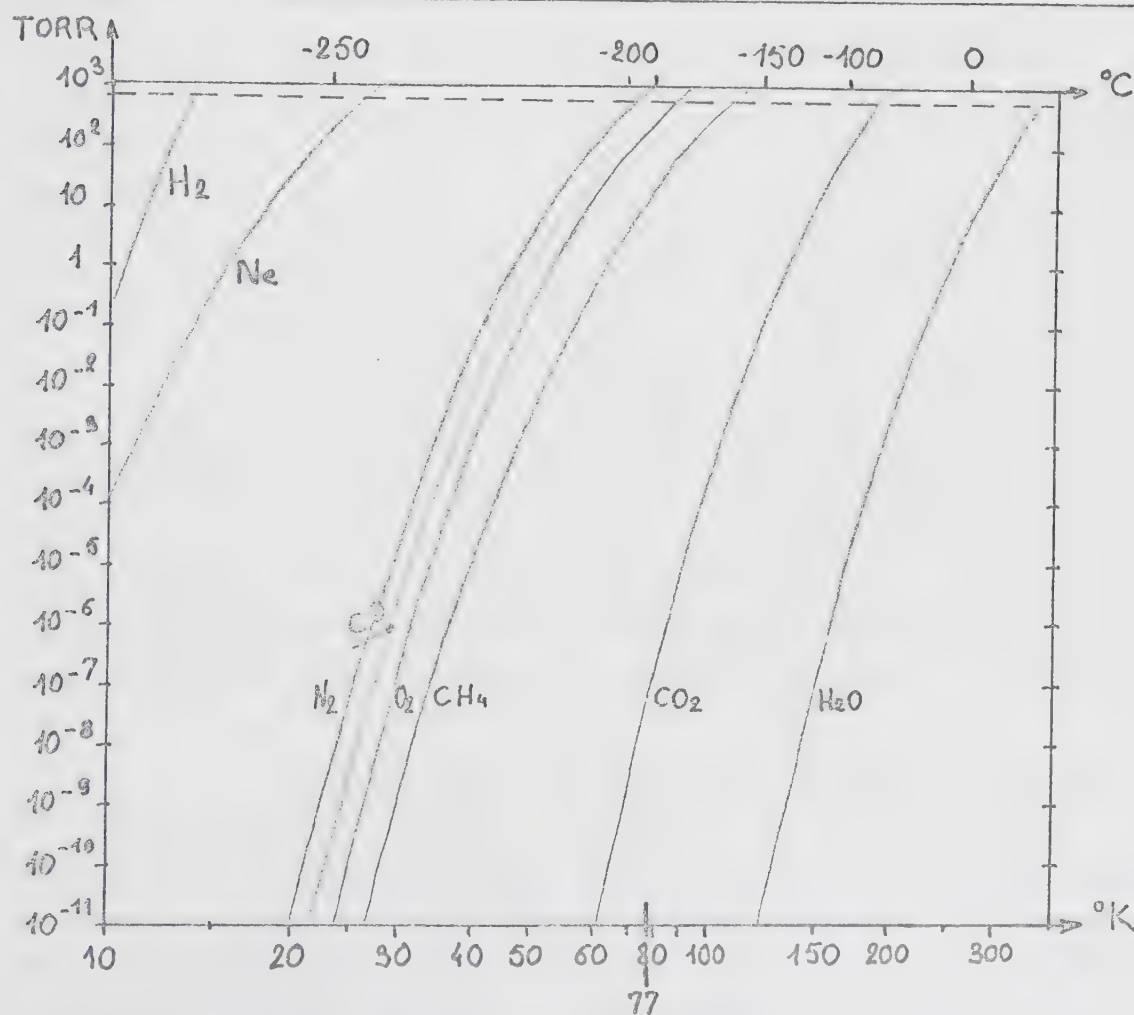
#### \*\* Tensions de vapeur

Les courbes représentées sur la figure 7 montrent l'influence de la température sur la pression de vapeur de différents gaz.





(Fig. 6) Courbe d'adsorption de la zéolithe 5A [17]



( Fig.7 ) Tensions de vapeur de quelques gaz.



On remarque qu'à la température de l'azote liquide (77°K), la pression partielle de l'eau est négligeable.

#### 2-4- Qualité du pompage

Ces modes de pompage, ayant des vitesses variables selon les gaz, ne conduiront pas à la même atmosphère résiduelle. Les valeurs des pressions résiduelles sont différentes suivant les conditions d'expérience et dépendent de la nature des constituants de l'enceinte, de son nettoyage, et des étuvages. Dans le tableau ci-dessous, nous ne donnerons donc que l'ordre d'importance des gaz résiduels.

|                                |                                                                                    |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| pompage à diffusion de mercure | $H_2$ , $CO$ , $CO_2$ , $H_2O$ , $O_2$ ; $CH_4$                                    |
| pompage ionique                | $H_2$ , $CO$ , $N_2$ , $A_r$ , $CH_4$ , $He$ , $H_2O$ , $CO_2$<br>quantités égales |
| pompage cryogénique à 77°K     | $A_r$ , $Ne$ , $He$ , $H_2$ , traces $H_2O$ et $CO$                                |
| pompage cryogénique à 4°K      | $H_2$ , $He$ , et $Ne$                                                             |

#### 2-5- Conclusion

Nous avons vu que les moyens d'obtenir des basses pressions sont nombreux. Dans la caméra électronique, un étuvage des parois et un refroidissement énergétique des plaques nucléaires sont indispensables pour éliminer la vapeur d'eau. La pression de travail est de quelques  $10^{-9}$  torr, les pressions partielles des gaz résiduels ont donc une action à peu près nulle sur la couche photoémissive. Cette faible pression est entretenue par un pompage cryogénique et par un pompage ionique qui compensent le dégazage résiduel.

Le pompage par groupe à diffusion de mercure, bien que donnant de bons résultats, est peu pratique d'emploi. La sécurité vis-à-vis des remontées de vapeur de mercure, qui ont pour effet de voiler les plaques nucléaires et de polluer le récepteur, est quelquefois difficile à assurer. On peut lui substituer un pompage ionique, qui permet en plus de détecter les fuites éventuelles. Ce pompage, utilisé pendant l'étuvage, est ensuite remplacé avantageusement par le pompage cryogénique. Pour favoriser celui-ci, il



y aura avantage à avoir le plus de surface possible à la température du liquide cryogénique. Ceci amènera donc à prévoir une technologie à base de joints métalliques à l'exclusion de toute graisse ou mastic.

En pompage cryogénique, le fluide idéal serait l'hélium liquide. Son emploi est limité par son prix et par le fait que l'étude et la réalisation d'une enceinte adaptée est compliquée et coûteuse. On emploiera donc l'azote liquide qui n'a pas ces inconvénients, d'autant plus que la présence d'un liquéfacteur d'air liquide (78,8°K) sur les lieux d'une mission peut simplifier l'approvisionnement.

Le pompage ionique puis le pompage cryogénique par zéolithe à température de l'azote liquide, amèneront les tensions de vapeur des gaz résiduels à des valeurs voisines de quelques  $10^{-10}$  torr, en particulier  $H_2O$ ,  $O_2$  et  $CO$ . Ces gaz seront donc sans effet sur la couche photoémissive. La pression totale, voisine de quelques  $10^{-9}$  torr, sera suffisante pour ne pas être la cause de bruit de fond.

#### Expérience

En laboratoire, une expérience de vide limite a été menée sur une enceinte composée d'acier inoxydable et de scellements céramique -cuivre, l'ensemble était monté en joints métalliques (cuivre). La pression était mesurée par une jauge Bayart-Alpert, dont le filament chaud donnait une lecture pessimiste. L'enceinte comprenait en outre deux plaques nucléaires, de dimension 1x3 pouces, et quelques grammes de zéolithe.

A température ambiante, cette enceinte était reliée à une pompe ionique par un tube de cuivre. Celui-ci a été serti, et l'ensemble plongé dans un cryostat d'azote liquide. Après quelques heures de stabilisation, l'azote liquide a été remplacé par de l'hélium liquide.

Les résultats obtenus sont les suivants :

| Conditions de température : | pression lue à la jauge (en torr) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| ambiante (300° K) :         | $10^{-4}$                         |
| azote liquide (77° K) :     | $3,5 \times 10^{-8}$              |
| hélium liquide (4°K) :      | $< 10^{-11}$ (limite de la jauge) |

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt du pompage cryogénique. Dans cette expérience, toutes les parois étaient à température du liquide cryogénique. Ceci n'est pas toujours possible, le dégazage des parties chaudes limite alors la pression.



### 3 Conditions de maintien de haute tension

Les électrons émis par la couche photoélectrique, sont accélérés par une forte différence de potentiel, de l'ordre de 30 kV. La focalisation de ces électrons sur les plaques électrographiques, nécessaire à la reconstitution de l'image, est due à trois lentilles électrostatiques. Ces lentilles établissent un rapport de tension dont la valeur doit être tenue d'une façon rigoureuse (quelques  $10^{-3}$ ) pour atteindre un bon stigmatisme. Les champs électriques importants établis sont, en général, générateurs de bruit de fond : c'est-à-dire d'électrons parasites ne faisant pas partie du signal.

Dans les phénomènes fort complexes qui se produisent, nous essaierons de dégager quelles sont les conditions à remplir. Nous verrons les différents rôles joués : par la pression régnant dans l'enceinte, par la forme et la nature des lentilles électrostatiques, par le gradient de potentiel, au niveau de la couche par les précautions à prendre lors d'une expérience.

#### 3-1- Influence de la tension sur le bruit de fond

Le bruit de fond est dû à des électrons parasites ne faisant pas partie du signal. Si, entre deux électrodes séparées par un corps isolant, on établit une différence de potentiel, on peut détecter un certain courant. Ce courant augmente avec la tension, et à une certaine valeur il y a formation d'une étincelle. De même, dans un gaz, pour une pression et un écartement donnés, il y a une décharge pour une certaine valeur de la tension. Le claquage est dû à une dissociation d'une molécule gazeuse par l'arrachement d'un électron. L'ion négatif, ou l'électron, est capté par l'anode; l'ion positif, constitué par le reste de la molécule retourne à la cathode. Le claquage peut avoir pour origine une ionisation gazeuse, une ionisation de surface, ou une émission de champ.

La valeur de la tension, provoquant ce claquage, dépend des conditions de pression, de gradient de potentiel, de forme et d'état de surface des électrodes.

##### 3-1-1- Rôle de la pression

D'après la loi de Paschen, le mécanisme de claquage est indépendant de la pression, si le libre parcours moyen des électrons et des ions, se déplaçant dans le gaz résiduel, est supérieur à la distance inter-électrode. Ce libre parcours moyen dépend de la nature du gaz et de la pression.



Tableau du libre parcours moyen (en centimètre) de certains gaz, suivant la pression

---

| gaz                                  | H <sub>2</sub>    | He                 | H <sub>2</sub> O<br>vapeur | N <sub>2</sub>    | Air               | O <sub>2</sub>    | A <sub>r</sub>    | CO <sub>2</sub>   |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Pression<br>de 10 <sup>-3</sup> torr | 9                 | 14                 | 3,2                        | 4,8               | 4,9               | 5,2               | 5                 | 3,2               |
| Pression<br>de 10 <sup>-6</sup> torr | 9x10 <sup>3</sup> | 15x10 <sup>3</sup> | 2x10 <sup>3</sup>          | 5x10 <sup>3</sup> | 5x10 <sup>3</sup> | 5x10 <sup>3</sup> | 5x10 <sup>3</sup> | 2x10 <sup>3</sup> |

La facilité du claquage dépend du potentiel d'ionisation qui varie suivant la nature du gaz et l'énergie des électrons.

On peut classer les gaz suivant l'ordre croissant du potentiel d'ionisation :

| Gaz                       | Hg   | A <sub>r</sub> | N <sub>2</sub> | Ne   | He   |
|---------------------------|------|----------------|----------------|------|------|
| Potentiel<br>d'ionisation | 10,4 | 15,7           | 16,3           | 21,5 | 24,5 |

Dans une enceinte, l'établissement de hautes tensions se fera donc d'autant mieux que la pression sera basse.

### 3-1-2 - Rôle du gradient de tension

Quand un champ électrique intense est établi au voisinage d'un corps, il y a une émission spontanée d'électrons : c'est l'émission de champ ou émission froide. Le champ électrique ayant pour effet de diminuer le travail d'extraction des électrons. Le courant émis dépend de la nature du corps et de la valeur du champ électrique :

$$I = c \cdot E^2 \cdot e^{-d/E}$$

I = courant électronique

c et d = coefficients dépendant de la nature du corps

E = valeur du champ électrique

Ce courant sera d'autant plus faible, que le champ électrique sera peu élevé. Cependant, dans la caméra électronique, le champ doit atteindre une valeur suffisante pour capter tous les électrons émis par la couche photoémissive. Un champ électrique de 170 V/cm au niveau de la photocathode satisfait à ces deux conditions et ne provoque pas d'émission parasite sensible.



### 3-1-3- Rôle de la forme et de l'état de surface des électrodes

L'établissement de haute tension dans une enceinte dépend de sa géométrie et de sa nature. Pour un conducteur donné, le champ électrique est fonction de la courbure de sa surface. Une forte courbure correspond à un champ très intense, ce qui favorise l'émission de champ : c'est l'effet de pointe. Cet effet est diminué par une bonne finition des différentes électrodes et en soignant la propreté de l'enceinte afin d'éviter les poussières. Il faut, par contre, prendre des précautions vis à vis d'un polissage mécanique trop poussé qui risque d'introduire des corps étrangers dans le métal à polir et diminuer ainsi le travail d'extraction.

Un corps peut également émettre des électrons secondaires sous l'action d'électrons incidents. Cette émission secondaire dépend de la nature du matériau, de l'énergie des électrons primaires, de l'angle d'incidence avec lequel arrivent ces électrons. Cette émission, définie par un coefficient ( $\delta$ ), est le rapport du nombre d'électrons secondaires émis sur le nombre d'électrons primaires incidents. Quelques valeurs de  $\delta$  sont rassemblées dans le tableau suivant :

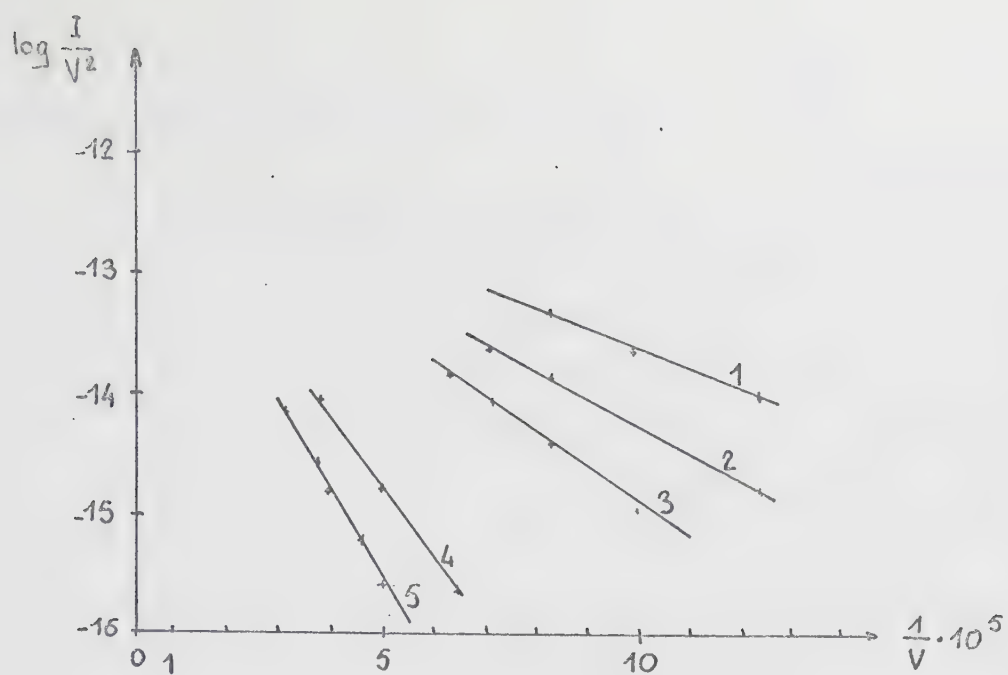
| Eléments          | $\delta$ | Energie cinétique des électrons primaires (eV) |
|-------------------|----------|------------------------------------------------|
| Al                | 1        | 300                                            |
| Cs                | 0,72     | 400                                            |
| Cu                | 1,3      | 600                                            |
| Au                | 1,46     | 750                                            |
| Ag                | 1,5      | 800                                            |
| SbCs <sub>3</sub> | 8,3      | 450                                            |
| AgOCs             | 9        | 800                                            |

Le coefficient  $\delta$  diminue quand la surface est rugueuse ou dépolie, par contre, il croît avec l'angle d'incidence des électrons primaires.

L'émission de champ des électrons dépend de l'état superficiel des électrodes. Celles-ci devront subir un nettoyage poussé, soit chimiquement, soit par bombardement électronique, soit par dégazage sous vide.

Pour obtenir une bonne tenue en tension, il est nécessaire de "former les électrodes". Quand on augmente lentement la tension, des micro-décharges apparaissent à une certaine valeur  $V$ , provoquant un claquage de tension. Une seconde montée en tension nous amènera à une valeur  $V + \Delta V$  avant l'apparition du même phénomène. Ainsi de proche en proche, on arrive à obtenir des valeurs de tension de rupture qui peuvent être doubles des valeurs de tension de travail. C'est une sécurité indispensable pour suppri-





( Fig.8) Courbes caractéristiques de formation d'électrodes [18.]

(Les numéros correspondent aux montées successives de la tension V)



mer toute émission d'électrons parasites.

### Expérience de Zeitoun-Fakiris [18] (figure 8)

Dans cette expérience de conditionnement d'électrodes par claquage, le montage est composé d'électrodes planes, en cuivre, espacées de 2 mm, et placées dans une enceinte à vide où la pression est de  $10^{-6}$  torr. Les montées en tension s'établissent lentement, et se terminent toutes par un claquage. Celui-ci, émis au niveau d'une micropointe, produit une érosion de surface et diminue ainsi le relief de cette micropointe. A la montée en tension suivante, le champ électrique peut être plus important jusqu'à ce que le même phénomène se produise pour une autre micropointe. Sur la figure 8, la pente des courbes augmente avec le numéro d'ordre de relevées de celles-ci. On voit que l'on arrive à doubler le potentiel entre les deux électrodes, par montées progressives jusqu'au claquage.

### 3-1-4 - Forme des électrodes et carte des équipotentiellles

Pour obtenir la focalisation d'un pinceau d'électrons, dans un système électrostatique, il faut déterminer le champ électrique en chaque point de la trajectoire d'un électron. Il existe plusieurs méthodes de détermination d'une carte de potentiels : les unes analogiques et peu précises (papier conducteur, réseaux de résistances, cuve électrolytique) les autres numériques.

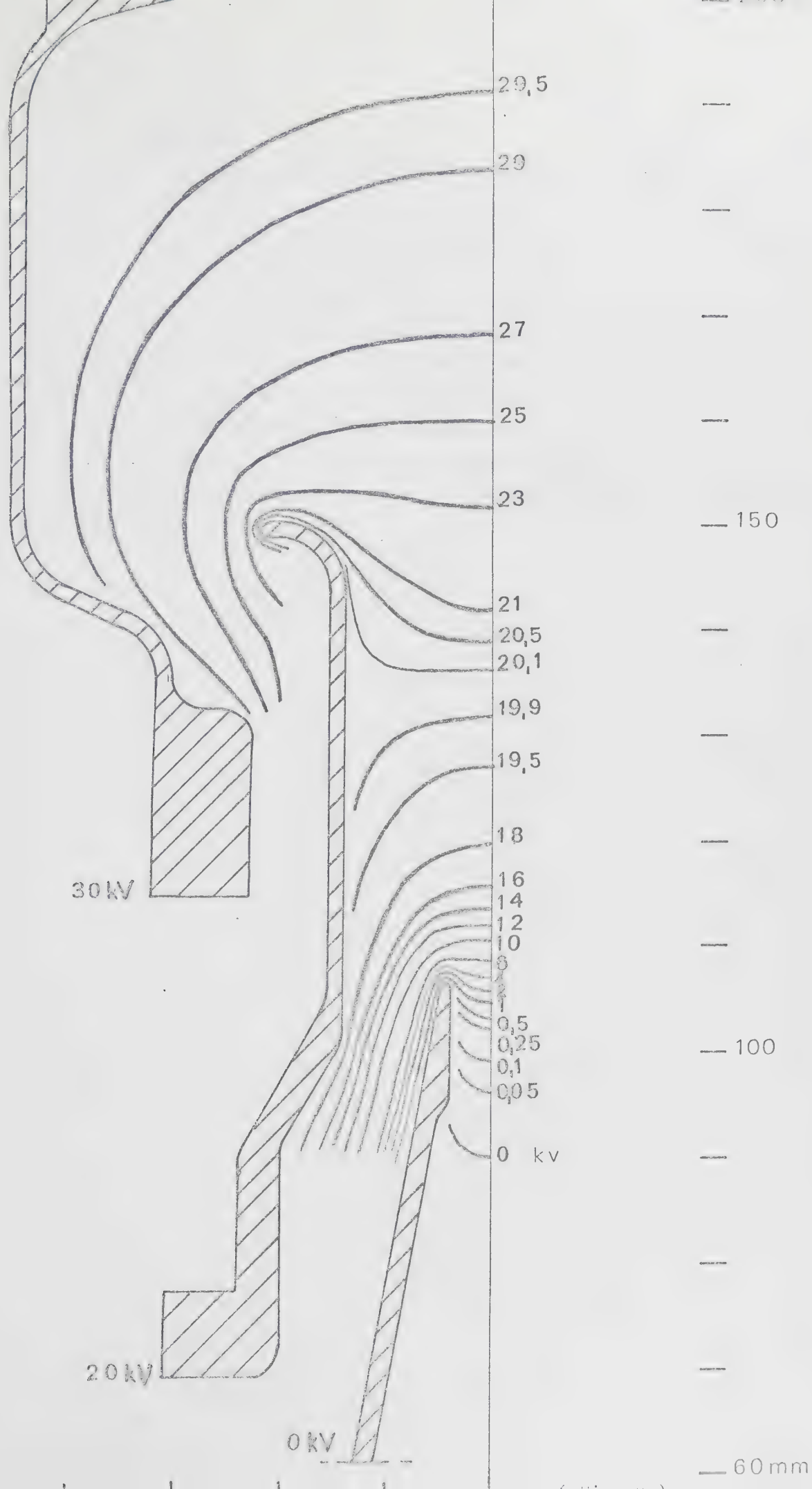
Nous décrivons très brièvement la méthode numérique employée par J.P.PICAT pour la caméra électronique, qui a utilisé un ordinateur IBM 360-65.

L'optique électronique ayant un axe de révolution, en chaque point d'un plan contenant l'axe de symétrie, on doit satisfaire l'équation de Laplace :

$$\Delta V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dV}{dr} + \frac{d^2 V}{dz^2} = 0$$

(r et z étant respectivement les coordonnées radiale et axiale du point de potentiel V). On calcule V en intégrant numériquement cette équation. Pour cela, on établit dans un demi plan de symétrie un quadrillage, à pas très serré, si l'on recherche une grande précision, donnant un réseau de noeuds. Par itérations, on cherche la valeur du potentiel en chaque noeud du réseau en fonction des potentiels des 4 noeuds les plus rapprochés. Les conditions aux limites de cette intégration sont définies par les potentiels des différentes électrodes. Sur la figure 9, sont représentées quelques équipotentiellles issues de ces calculs.







Remarques.

• La photocathode n'a pas de pénétration et est confondue avec la cathode.

.. La distance du plan image (potentiel 0 volt) à la photocathode (potentiel 30 KV) est de 200 mm.

... Le champ le plus intense est au niveau du haut du cône et égal à 4 KV/mm. C'est donc un endroit susceptible d'être à l'origine de micro-décharges. Ceci a été vérifié par un essai, consistant à mettre l'optique électronique dans une cloche à vide où règne une pression de  $10^{-7}$  torr: une effluve apparaissait entre la pointe du cône et l'intérieur du champignon pour une différence de potentiel de 35 kV entre ces deux électrodes. On diminuerait cet effet, en rendant le rayon de courbure plus important au sommet du cône.



### 3.2 - Qualités des images

Les distances inter-électrodes de la caméra électronique étant parfaitement définies et constantes, la focalisation du pinceau d'électrons, émis par chaque point de la couche photosensible et enregistré par la plaque nucléaire, dépendra du rapport de tension entre les 3 électrodes. C'est la stabilisation de ce rapport qui agira sur la définition de l'image.

Si  $V$  est la valeur du potentiel de la photocathode,  $v$  celui de l'électrode intermédiaire (champignon), l'anode (cône et plan image) étant à la masse on peut écrire : 
$$r \approx \frac{V - v}{v}$$

Ce rapport doit être maintenu à quelques  $10^{-3}$  près, ce qui laisse une variation de  $\pm 20$  volts sur  $v$ , avec  $V = 30$  kV et  $v = 20$  kV.

Les variations du potentiel sont dues à un courant de fuite entre les électrodes. Ce courant de fuite dont les effets interviennent sur le bruit de fond (voir 3-1) peut être dû à un mauvais isolement des conducteurs. Ces variations peuvent également provenir d'une mauvaise stabilité de l'alimentation haute tension.

La liaison entre une alimentation haute-tension et une électrode peut être à l'origine de fuite de courant. En règle générale, il ne faut pas que le fil conducteur soit en contact avec un mauvais isolant (air ambiant). Les fils seront donc entourés d'un isolant ayant un haut coefficient diélectrique (téflon).

Au niveau des électrodes, on peut créer un environnement contrôlé qui aura l'avantage d'être reproductible. Le courant de fuite résiduel aura ainsi toujours la même valeur. Dans la caméra électronique Lallemand, pour diminuer ce courant, les liaisons haute tension se font par l'intermédiaire de boules métalliques de 4 à 5 cm de diamètre, et de l'air sec est soufflé sur les contacts. On peut également envisager d'immerger les électrodes dans de l'azote liquide qui se comporte comme un excellent isolant, ayant un diélectrique de  $\epsilon = 1,433$ .

Les électrodes sont liées rigidement entre elles par des isolants qui leur imposent un bon maintien mécanique, en centrage et en écartement. Il se crée un courant de fuite par glissement sur l'isolant. Celui-ci doit offrir une grande ligne de fuite et être un mauvais conducteur électrique. Il est avantageux d'utiliser le verre et la céramique. Les contacts entre isolants et conducteurs doivent être excellents si l'on veut éviter qu'il s'y établisse des champs électriques élevés avec risque de claquage. C'est pourquoi les liaisons seront réalisées de préférence par des soudures verre-métal, ou par des brasures céramique-métal.



### 3-3 - Conclusion

L'établissement et le maintien de haute tension à des valeurs élevées se heurtent à des problèmes nombreux et complexes. De cette étude, nous pouvons dégager quelques impératifs de construction et de fonctionnement.

Pour éviter des micro-décharges, l'enceinte sera le siège d'une basse pression, inférieure à  $10^{-6}$  torr. Les électrodes ne devront pas avoir d'arêtes vives afin d'éviter l'effet de pointes. Les isolants, séparant ces électrodes, auront une longueur de fuite qui sera fonction de la tension appliquée; de façon à éviter le glissement, une longueur de 2,5 cm par kilovolt offre une bonne sécurité. Chaque partie conductrice "baignera" dans un environnement imposé : Téflon pour les fils, gaz ou liquide à fort pouvoir diélectrique pour les électrodes. L'ensemble des constituants de l'enceinte électronique sera soigneusement nettoyé et exempt de poussière. Enfin, avant chaque expérience, les électrodes devront être "formées".



#### / 4 / OBTENTION DE BASSE TEMPERATURE /

Dans la caméra électronique, l'obtention d'une basse température est nécessaire pour ne pas dégrader l'association des effets photoélectrique et électronographique. En refroidissant énergiquement la caméra on limite le dégazage des plaques nucléaires, on favorise le cryo-pompage du charbon actif ou des zéolithes, et des parois de l'enceinte. On diminue la vitesse des réactions chimiques de la couche photosensible, et l'émission thermoélectronique de la photocathode.

Le refroidissement de la cathode et du porte-plaques peut se faire par conduction au moyen de tiges métalliques plongeant dans un liquide cryogénique. (Caméra électronique Lallemand). Il peut se faire aussi en immergeant directement l'optique électronique et son porte-plaques dans ce liquide cryogénique qui seul impose l'autonomie de l'ensemble. Nous essaierons de définir les pertes thermiques et nous verrons comment les diminuer afin d'augmenter cette autonomie.

##### 4-1 - Influence sur l'émission thermoélectrique.

L'énergie de sortie d'un électron peut être fournie par l'agitation thermique. Cette émission thermoélectronique est une fonction rapidement croissante de la température. Elle est donnée par la formule de Richardson :

$$I = (1 - R) a \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

$eV_0$  = énergie de sortie de l'électron

$k$  = constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-16}$  (CGS)

$a$  = constante universelle =  $120 \text{ A cm}^{-2} \text{ degré}^{-2}$

$T$  = température absolue

$R$  = probabilité pour qu'un électron excité ne sorte pas du solide.

Pour la couche  $\text{SbCs}_3$  :  $R = 0,7$  - Pour la couche  $\text{Ag-O-Cs}$  :  $R = 0,9$

Valeurs de courant d'émission thermoélectronique pour des couches photosensibles de 1 cm<sup>2</sup> de surface. [7]

| température T | SbCs <sub>3</sub>     |                       | Ag.O.Cs               |                      |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
|               | intensité (A)         | électron/sec.         | Intensité             | elec/sec.            |
| 293°K         | $1,1 \times 10^{-18}$ | 9,5                   | $1,1 \times 10^{-9}$  | $9,5 \times 10^9$    |
| 123°K         | $2,6 \times 10^{-50}$ | $1,6 \times 10^{-31}$ | $2,9 \times 10^{-28}$ | $1,8 \times 10^{-9}$ |
| 77°K          | $1,5 \times 10^{-82}$ | $1 \times 10^{-64}$   | $5 \times 10^{-47}$   | $3 \times 10^{-29}$  |



A basse température, cette émission parasite est donc négligeable. En effet, à  $-150^{\circ}\text{C}$ , température facilement atteinte dans la caméra électronique, avec une couche  $\text{SbCs}_3$ , il faudrait poser  $6 \times 10^{34}$  heures, et avec une couche  $\text{AgOCs}$ ,  $6 \times 10^{12}$  heures, pour avoir une densité de 0,1 sur une plaque Ilford G5.

#### 4-2 - Autonomie en liquide cryogénique.

Le liquide le plus employé est l'azote liquide. Sa commodité d'emploi liée à sa grande capacité calorifique, son inertie chimique et son faible prix de revient en sont la cause. Sa température d'ébullition est  $77^{\circ}\text{K}$ , sa conservation nécessite donc l'emploi d'un cryostat.

L'autonomie d'un cryostat est déterminée par les apports de chaleur provenant de l'extérieur. Ceux-ci ont plusieurs causes : transfert de chaleur par conduction et par rayonnement thermique.

##### a) Conduction gazeuse

La conductibilité thermique d'un gaz dépend du libre parcours moyen des molécules.

La puissance dissipée répond à la formule simplifiée :

$$W = A.C.Si.P (T_e - T_i)$$

$W$  = chaleur transmise en milliwatt. $\text{cm}^{-2}.\text{torr}^{-1}.\text{deg}^{-1}$ .

$A$  = constante dépendant du gaz résiduel (16 pour l'air).

$c$  = coefficient d'accommodation variant avec la nature du gaz résiduel et la température (pour l'air :  $c=0,8$  à  $300^{\circ}\text{K}$ ;  $c=1$  à  $77^{\circ}\text{K}$ ).

$Si$  = surface de la paroi à basse température en  $\text{cm}^2$ .

$P$  = pression du gaz en torr.

$T_e$  = température absolue de la paroi extérieure, en contact avec l'air ambiant.

$T_i$  = température absolue de la paroi intérieure, en contact avec le liquide cryogénique.

Exemple : La puissance dissipée pour une surface de  $1000 \text{ cm}^2$  entre la température ambiante ( $T_e = 300^{\circ}\text{K}$ ) et la température de l'azote liquide ( $77^{\circ}\text{K}$ ) à une pression de  $10^{-4}$  torr. est  $W = 350 \text{ mW}$ .

Or, 1 watt évapore  $22,3 \text{ cm}^3$  d'azote liquide par heure, ce qui correspond à une perte de  $8 \text{ cm}^3$  par heure.

Le liquide cryogénique est conservé dans une enceinte à double paroi où l'on établit une pression inférieure à  $10^{-4}$  torr. Pour cela, avant scellement, les parois sont soigneusement nettoyées et étuvées, ce qui conduit à des pertes insignifiantes.



### b) Conduction dans les solides

La puissance transmise par un solide suit une loi de la forme :

$$W_S = \frac{S}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) \cdot dT$$

$W_S$  = puissance transmise en watts

$S$  = section du solide en  $\text{cm}^2$

$L$  = longueur du solide en cm

$T_1, T_2$  = températures absolues des extrémités du solide.

$k$  = conductibilité thermique dépendant de la température et de la nature du corps.

La puissance transmise est proportionnelle à la surface, inversement proportionnelle à la longueur du solide, et varie avec sa nature.

Exemple : Une tige d'acier inoxydable de 10 cm de long, et de 1 cm de diamètre, dont les extrémités sont à 77°K et 300°K, transmettra 2,15 watts.

Un tube du même matériau de 10 cm de long, de 1 cm de diamètre et de 0,5 mm d'épaisseur transmettra 430 mW.

Le cuivre a une conductibilité qui est 50 fois plus importante que celle de l'acier inoxydable à la température ambiante. A la température de l'azote liquide, ce facteur est de 200. Pour transmettre des frigories, on utilisera des barres de cuivre pleines et de diamètres importants. (tiges de refroidissement de la caméra Lallemand). Par contre, si l'on veut maintenir des pièces froides par rapport à l'air ambiant, on emploiera des tubes minces d'acier inoxydable. Pour éviter des longueurs trop importantes, on aura recours à des soufflets hydroformés en acier inoxydable qui permettront d'allonger le chemin de fuite pour un faible encombrement.

### c) Echange thermique par rayonnement

Les échanges thermiques par rayonnement se font principalement en grande longueur d'onde : 9,65  $\mu$  à 300°K et 37,6  $\mu$  à 77°K. Le pouvoir émissif d'une surface métallique dépend beaucoup de son traitement. Entre deux surfaces, la chaleur rayonnée est de la forme :

$$W_r = \frac{Si}{\frac{1}{\epsilon_i} + \left( \frac{1}{\epsilon_e} - 1 \right) \frac{Si}{Se}} \cdot 5,7 \times 10^{-12} (T_e^4 - T_i^4)$$

$W_r$  = puissance transmise en watt.



### b) Conduction dans les solides

La puissance transmise par un solide suit une loi de la forme :

$$W_s = \frac{S}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) \cdot dT$$

$W_s$  = puissance transmise en watts

$S$  = section du solide en cm<sup>2</sup>

$L$  = longueur du solide en cm

$T_1, T_2$  = températures absolues des extrémités du solide.

$k$  = conductibilité thermique dépendant de la température et de la nature du corps.

La puissance transmise est proportionnelle à la surface, inversement proportionnelle à la longueur du solide, et varie avec sa nature.

Exemple : Une tige d'acier inoxydable de 10 cm de long, et de 1 cm de diamètre, dont les extrémités sont à 77°K et 300°K, transmettra 2,15 watts.

Un tube du même matériau de 10 cm de long, de 1 cm de diamètre et de 0,5 mm d'épaisseur transmettra 430 mW.

Le cuivre a une conductibilité qui est 50 fois plus importante que celle de l'acier inoxydable à la température ambiante. A la température de l'azote liquide, ce facteur est de 200. Pour transmettre des frigories, on utilisera des barres de cuivre pleines et de diamètres importants. (tiges de refroidissement de la caméra Lallemand). Par contre, si l'on veut maintenir des pièces froides par rapport à l'air ambiant, on emploiera des tubes minces d'acier inoxydable. Pour éviter des longueurs trop importantes, on aura recours à des soufflets hydroformés en acier inoxydable qui permettront d'allonger le chemin de fuite pour un faible encombrement.

### c) Echange thermique par rayonnement

Les échanges thermiques par rayonnement se font principalement en grande longueur d'onde : 9,65  $\mu$  à 300°K et 37,6  $\mu$  à 77°K. Le pouvoir émissif d'une surface métallique dépend beaucoup de son traitement. Entre deux surfaces, la chaleur rayonnée est de la forme :

$$W_r = \frac{S_i}{\frac{1}{\epsilon_i} + \left( \frac{1}{\epsilon_e} - 1 \right) \frac{S_i}{S_e}} \cdot 5,7 \times 10^{-12} (T_e^4 - T_i^4)$$

$W_r$  = puissance transmise en watt.



$S_i$  et  $S_e$  = surface des parois intérieure et extérieure en  $\text{cm}^2$ .

$\epsilon_i$  et  $\epsilon_e$  = émissivités des parois intérieures et extérieures qui dépendent de la nature de la paroi, de son état de surface et de la température. Ainsi  $\epsilon$  est 10 fois moins important pour l'acier inoxydable que pour le verre, il diminue avec la température et le polissage.

$T_i$  et  $T_e$  = température absolue des parois intérieures et extérieures.

Exemple : Deux surfaces en acier inoxydable poli, placées en regard, de  $1000 \text{ cm}^2$  de surface, l'une à température ambiante et l'autre à température de l'azote liquide, auront un échange thermique de 1,5 watt.

Pour éviter des pertes thermiques trop importantes, on polit et on dore les surfaces en regard, (l'or ayant un très faible coefficient d'émissivité).

#### 4-3 - Conclusion

Le refroidissement, nécessaire à l'obtention du vide poussé, et à l'élimination de l'émission thermoélectronique de la photocathode, s'obtient par l'emploi d'azote liquide. On peut également employer de l'air liquide (température d'ébullition de  $78,8^\circ\text{K}$ ) si on utilise, en mission lointaine, un liquéfacteur.

L'autonomie de la caméra électronique dépend de l'autonomie en liquide cryogénique. Celle-ci sera d'autant plus grande que les échanges thermiques avec des éléments à température ambiante seront réduits. On emploiera de l'acier inoxydable de faible section pour provoquer une bonne impédance. Les surfaces seront polies et le liquide cryogénique sera entouré d'un vide d'isolement. Par contre, si l'on veut transmettre des frigories, on emploiera de préférence du cuivre, et les surfaces seront noircies.

L'emploi de métaux à basse température n'offre pas de difficultés en général. Les aciers inoxydables, le cuivre, l'aluminium, le laiton restent ductiles à basse température. Il faudra tenir compte de la contraction différentielle qui obligera parfois à un refroidissement lent pour éviter les cassures.



## 5 / MECANISME ET SOLIDITE/

L'emploi de la caméra électronique Lallemand nécessite des déplacements de pièces pour transférer la photocathode, pour déplacer l'obturateur et pour changer les plaques nucléaires. L'ensemble doit avoir une bonne tenue mécanique afin de conserver le centrage nécessaire aux lentilles électrostatiques et résister aux différences de température.

### 5-1 - Mouvements mécaniques

Ces mouvements sont utiles pendant les deux phases d'emploi de la caméra. Pendant la préparation, ils permettent de transférer la photocathode de son ampoule d'attente, au centre de la cathode de l'optique électronique. Pendant l'utilisation, ils permettent le déplacement de l'obturateur, et l'échange des plaques nucléaires. Ces mouvements se font toujours dans un vide poussé, soit à température ambiante, soit à basse température.

L'ambiance de travail (vide et froid) interdit l'emploi de lubrifiants classiques pour limiter les frottements. Les meilleures graisses ont une tension de vapeur de quelques  $10^{-6}$  torr, et à basse température, leur pouvoir lubrifiant est inexistant, d'autant plus que sous vide, leur évaporation est rapide. Dans l'ultravide, l'oxygène est en quantité très faible. Cette absence de gaz ralentit considérablement la formation d'oxydes superficiels servant de "lubrifiants naturels". [24]

Si l'effort de liaison des pièces est faible, ou si les pièces ne sont pas de même nature, le frottement se fait en général sans difficulté. (Exemple : glissement des masselottes en fer doux sur le verre, glissement de l'obturateur, rotation du barillet). Les difficultés augmentent avec l'effort de liaison et avec des pièces de <sup>même</sup> nature .. En général, un grippage se produit rapidement conduisant à un blocage. On évite cet effet en traitant les surfaces, soit par lubrification à la poudre de bisulfure de molybdène ou de sélénium, soit par nitruration ionique. Ce dernier traitement consistant à augmenter la dureté superficielle du métal. Les mouvements de rotation peuvent également être obtenus à l'aide de roulements à billes en acier inoxydable travaillant à sec. Différents essais sur la longévité, les efforts à transmettre, la température, nous ont prouvé que la nitruration ionique pour les déplacements longitudinaux, et les roulements à billes pour les rotations, étaient des solutions fiables et faciles à employer.



## 5-2 - Solidité

La précision mécanique apportée sur le centrage des lentilles électrostatiques doit se conserver quelque soit la température. Les différentes pièces composant l'optique électronique ne doivent pas se déformer ou se déplacer lors du changement de température, ou lors de légers chocs dus à une mauvaise manipulation. Ceci n'est pas toujours réalisé dans la caméra Lallemand. Elle reste en effet d'un maniement délicat en raison de sa forme et de ses constituants (verre, scellements verre-métal). Son transport, pour l'utilisation en mission lointaine, ne se fait pas sans risque.

Pour éviter que l'environnement ne perturbe les qualités de la caméra, on peut concevoir une autre technologie basée sur des brasures céramique-métal, de l'acier inoxydable soudé sous atmosphère d'argon. L'enceinte peut être composée d'éléments interchangeables permettant une réparation rapide et simple en cas de panne.



/ III / LA CAMERA ELECTRONIQUE CERAMIQUE - METAL /

- 1 - Ensemble caméra électronique
  - 1.1 - Description de l'optique électronique
  - 1.2 - Description du porte-plaques
  - 1.3 - Description du cryostat
- 2 - Ensemble d'introduction de photocathode
  - 2.1 - Modèle utilisé avec les photocathodes Observatoire de PARIS
    - 2.1.1 - Photocathode
    - 2.1.2 - Introducteur
  - 2.2 - Modèle utilisé avec les photocathodes R.T.C.
    - 2.2.1 - Photocathode
    - 2.2.2 - Introducteur
- 3 - Alimentation haute tension
- 4 - Description de la préparation d'une caméra
- 5 - Résultats obtenus au laboratoire
  - 5.1 - Pression
  - 5.2 - Température
  - 5.3 - Tenue en sensibilité des photocathodes
  - 5.4 - Résolution
  - 5.5 - Bruit de fond
  - 5.6 - Autonomie
- 6 - Résultats obtenus en mission d'éclipse.

16.

17.

18.

19.

20.

21.

22.

23.

### III - LA CAMERA ELECTRONIQUE - CERAMIQUE - METAL

Ce nouveau modèle de caméra électronique Lallemand utilise la technologie décrite dans le précédent chapitre. Les modifications introduites sont relatives aux conditions de maintien de haute tension, de fragilité et d'autonomie cryogénique. Elles permettront d'employer la caméra électronique indépendamment de l'environnement extérieur (missions difficiles, vol ballon).

Cette caméra électronique comporte deux parties essentielles :

- a) un ensemble composé de la caméra électronique proprement dite (optique électronique et porte-plaques)
- b) un ensemble servant à la préparation de la caméra et du transfert de la photocathode, et pouvant se désolidariser du récepteur.

Nous ferons une description succincte de ces ensembles, et nous donnerons les premiers résultats obtenus au laboratoire et en mission, lors de l'éclipse totale du soleil au Mexique en Mars 1970.



## / 1 / ENSEMBLE CAMERA ELECTRONIQUE /

C'est un cryostat en acier inoxydable, au centre duquel se trouvent l'optique électronique et le porte-plaques. L'environnement extérieur de l'optique électronique est constitué par de l'azote liquide contenu dans ce cryostat.

### 1 1 - Description de l'optique électronique (fig. 10)

C'est une enceinte étanche au vide, qui contient les trois lentilles électrostatiques. L'isolement électrique et la tenue mécanique sont maintenues jusqu'à la température de l'azote liquide.

Les matériaux employés sont les suivants :

a) comme conducteur, on utilise le cuivre OFHC, qui possède une excellente conductibilité tant thermique :  $\lambda = 0,934 \text{ cal. cm.}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$  qu'électrique :  $\rho = 15 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ .

B) comme isolant, on utilise l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  d'une pureté de 97 % pour permettre les brasures céramiques-métal. Sa rigidité diélectrique est de  $22 \text{ kV. mm}^{-1}$ . Elle est peu sensible aux chocs thermiques, métallisable pour le brasage et se rectifie au centième près.

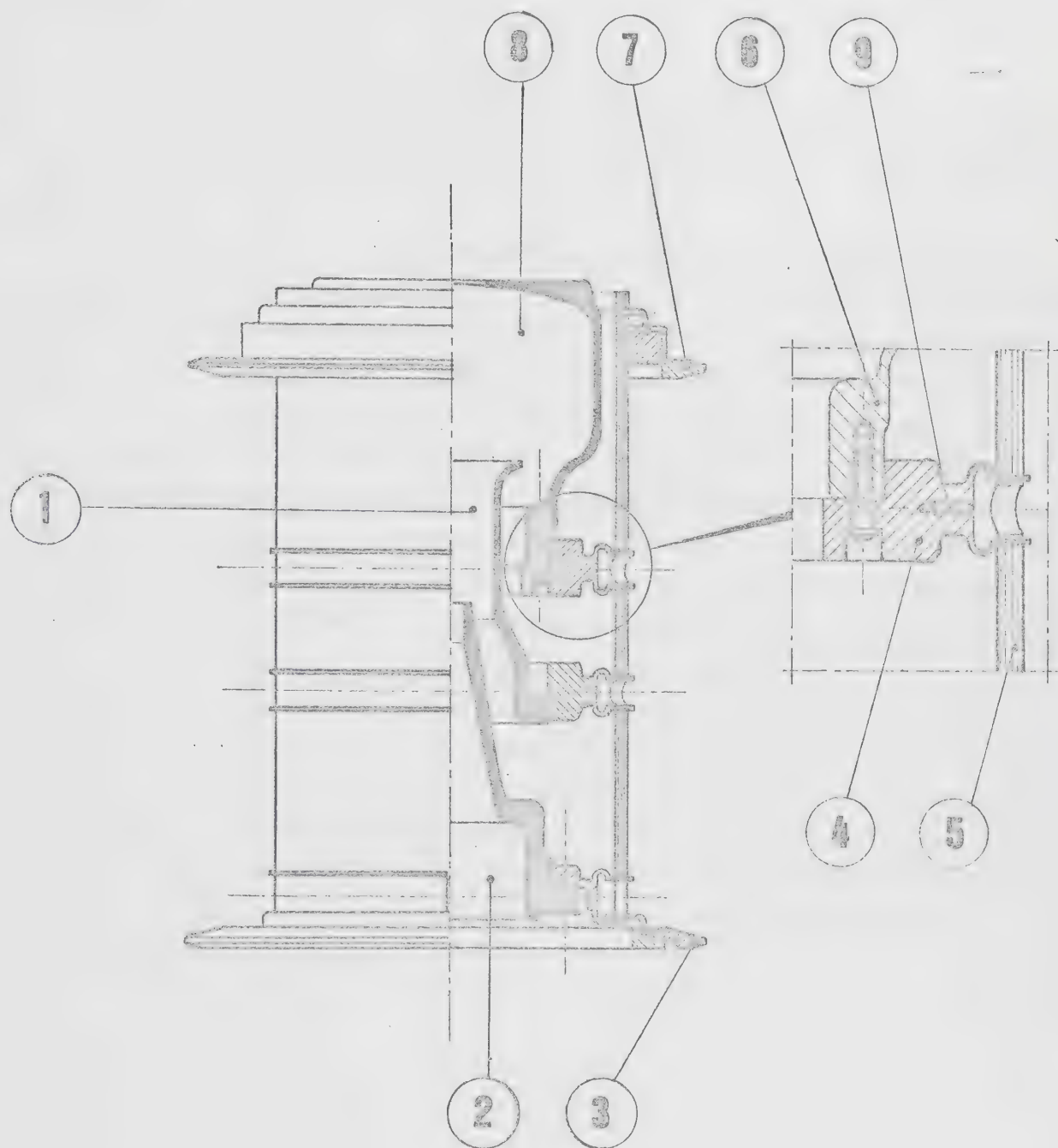
L'optique électronique se compose d'un empilement de couronnes de cuivre (4) et d'alumine (5) brasées avec un eutectique Argent-Cuivre. L'ensemble forme un cylindre étanche au vide et accepte une gamme importante de température (de  $4^\circ \text{K}$  à  $700^\circ\text{K}$ ). Ces couronnes en cuivre sont usinées après brasure, et servent de positionnement aux électrodes (8) (1) (2). Aux extrémités de ce cylindre, sont brasées deux collerettes en acier inoxydable (3) et (7), permettant l'adaptation sur un cryostat.

Pour que cet ensemble résiste à des chocs thermiques importants, il a été nécessaire de compenser la différence de dilatation entre le cuivre et la céramique ( $16,6 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $7 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ). A la suite de nombreux essais, la solution adoptée nous a conduit à lier ces deux matériaux par une membrane mince de cuivre en forme de soufflet. Ceci permet une immersion brutale de l'optique dans l'azote liquide. Par contre, lors d'un étuvage, la vitesse de montée en température ne doit pas dépasser  $5^\circ$  par minute.

La photocathode, positionnée sur la cathode (8) est refroidie rapidement à condition que le contact thermique soit bon. Celui-ci dépend de la force avec laquelle le contact est assuré. La photocathode, une fois en place est pressée fortement par un coin, ce qui lui permet d'atteindre la température de l'azote liquide en moins d'une heure.

.../...



OPTIQUE ELECTRONIQUE

( Fig. 10 )



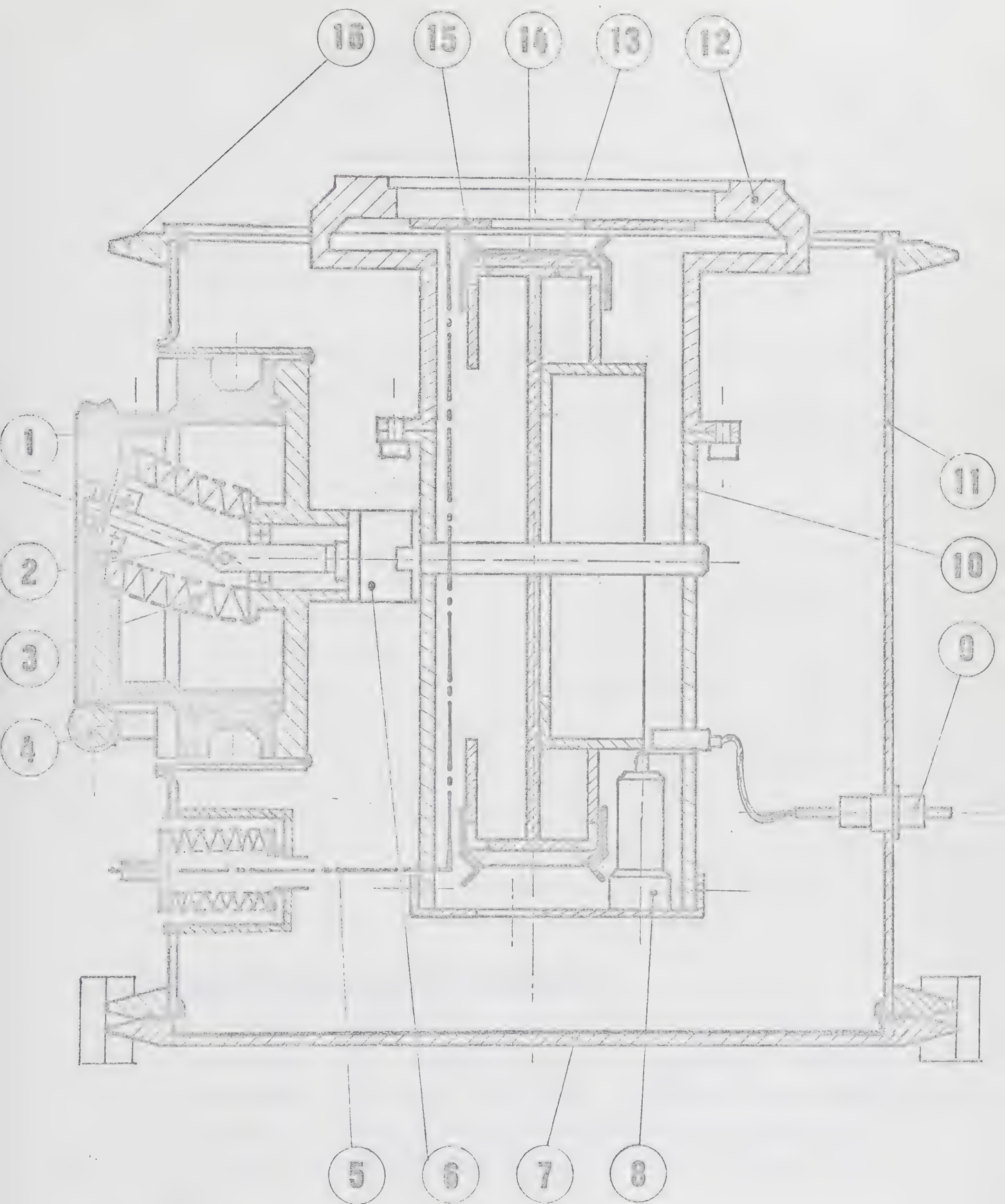
Pour des commodités d'emploi, le cône (2) est relié à la masse. Pour un rapport de 0,5 le champignon (1) est à un potentiel de -20 kV, la cathode (8) a un potentiel de -30 kV. Ceci explique les différentes hauteurs des anneaux en céramique, assurant la sécurité au glissement.

### 1.2 - Description du porte-plaques (fig. 11)

C'est un ensemble mécanique qui permet le mouvement d'un obturateur, le positionnement successif des plaques nucléaires, et leur remplacement rapide.

Les plaques nucléaires (14) au nombre de 18 (dimension 25,4 x 17 mm), sont appliquées sur un barillet (13) par l'intermédiaire de ressorts. La rotation du barillet se fait par l'intermédiaire d'un passage tournant, basé sur le principe de la "queue de chat" (2). On utilise un soufflet en acier inoxydable (3) qui assure l'étanchéité. Les axes sont tous montés sur roulement à billes standard, sauf pour le passage tournant. Pour celui-ci, une étude poussée a été nécessaire pour diminuer l'encombrement et le poids (1). Ce passage tournant est actionné au moyen d'un moteur électrique, par l'intermédiaire d'une vis tangente (4). La position de la plaque est déterminée par un doigt de positionnement (8) qui, par l'intermédiaire d'un contact électrique, affiche le numéro de la plaque. Ainsi, en employant des passages courants étanches (9) il est possible de télécommander la rotation du porte-plaques. L'obturateur (15) est commandé également par un moteur électrique qui actionne un soufflet en acier inoxydable (5). L'ensemble est logé dans un cylindre en acier inoxydable (11) qui se termine à ses extrémités par deux brides à joint indium (ou plomb) serrées par colliers "Veeflex". Elles permettent la liaison du porte-plaques et de l'optique électronique (16) et facilite l'accès au barillet (6).





( FIG. 11 )



### 1.3 - Description du cryostat

L'optique électronique et le porte-plaques sont immergés dans un bain d'azote liquide. Celui-ci crée un environnement approprié au cryopompage de la caméra, au refroidissement des plaques nucléaires et de la photocathode, et à l'isolement électrique. L'autonomie de la caméra est fonction des pertes thermiques. Le modèle décrit ci-dessous a une autonomie d'une dizaine d'heures, et a été avantageusement utilisé lors de l'expérience de l'éclipse totale du soleil au Mexique en Mars 1970.

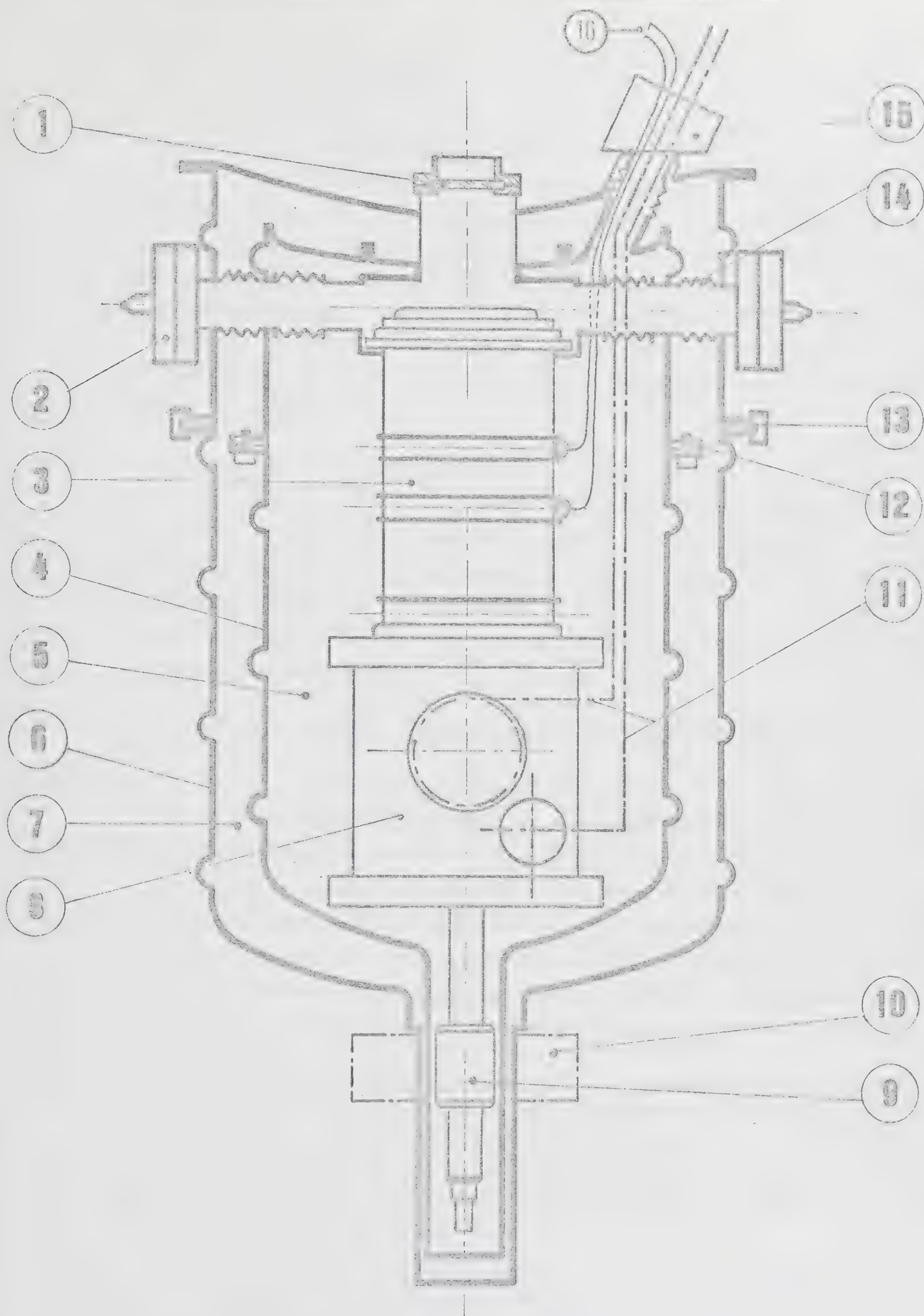
#### SCHEMA DE LA CAMERA ELECTRONIQUE CERAMIQUE-METAL (fig. 12)

- ( 1 ) Hublot - (étanchéité par joint indium)
- ( 2 ) Tunnel d'introduction de la photocathode et fermeture par un tube en cuivre serti
- ( 3 ) Optique électronique
- ( 4 ) Enceinte intérieure du cryostat en acier inoxydable poli
- ( 5 ) Bain d'azote liquide
- ( 6 ) Enceinte extérieure du cryostat en acier inoxydable poli
- ( 7 ) Vide d'isolement
- ( 8 ) Porte-plaques
- ( 9 ) Adaptation éventuelle d'une pompe ionique de 3 l/s
- (10) Aimant de la pompe ionique
- (11) Tringleries permettant des mouvements du porte-plaques
- (12) Bride à joint indium (serrage par vis)
- (13) Bride à joint en viton (serrage par collier "Veeflex")
- (14) Soufflets en acier inoxydable nécessaire à l'impédance thermique
- (15) Moteurs électriques commandant les mouvements
- (16) Fils isolés d'amenée de la haute tension.

#### / 2 / ENSEMBLE D'INTRODUCTION DE PHOTOCATHODES /

Cet ensemble sert au pompage de l'enceinte, et au transfert de la photocathode sur la cathode de l'optique électronique. Deux modèles ont été développés : l'un permet l'utilisation des photocathodes construites à l'Observatoire de Paris, l'autre est utilisé avec des photocathodes construites à la Radiotechnique-Hyperélec(R.T.C.) à la suite d'une étude commune.





( Fig. 12 )



## 2.1 - Modèle utilisé avec les photocathodes du type Observatoire de Paris.

### 2.1.1. Photocathode (fig. 13)

Ces photocathodes couvrent deux domaines en longueur d'onde : le visible avec la S 11, et l'infra-rouge avec la S 1. La photocathode est composée d'un ménisque (1) sur lequel est déposée la couche-photoémissive. Elle est maintenue à l'intérieur d'une ampoule en verre fin (2), par une tige métallique (3). Cette ampoule se termine par un tube (5) dont le queue-sotage assure l'étanchéité de l'enceinte. L'anode (4) permet la mesure de sensibilité de la couche. Le passage de l'ampoule en verre permet d'extraire la photocathode.

### 2.1.2. Introducteur

Pour utiliser ces photocathodes, le système employé est semblable à celui de la caméra électronique Lallemand. Dans ce dispositif, on interpose la caméra électronique céramique-métal entre le système de libération de photocathode (marteau) et le système de translation de la photocathode. La caméra est séparée du bâti de pompage et d'introduction par le sertissage de deux tubes en cuivre.

## 2.2 - Modèle utilisé avec les photocathodes du type R.T.C.

### 2.2.1. Photocathode (fig. 14)

Ces photocathodes couvrent une gamme étendue de longueur d'onde. La R.T.C. fabrique des TeCs, S 11, S 20 et S 1.

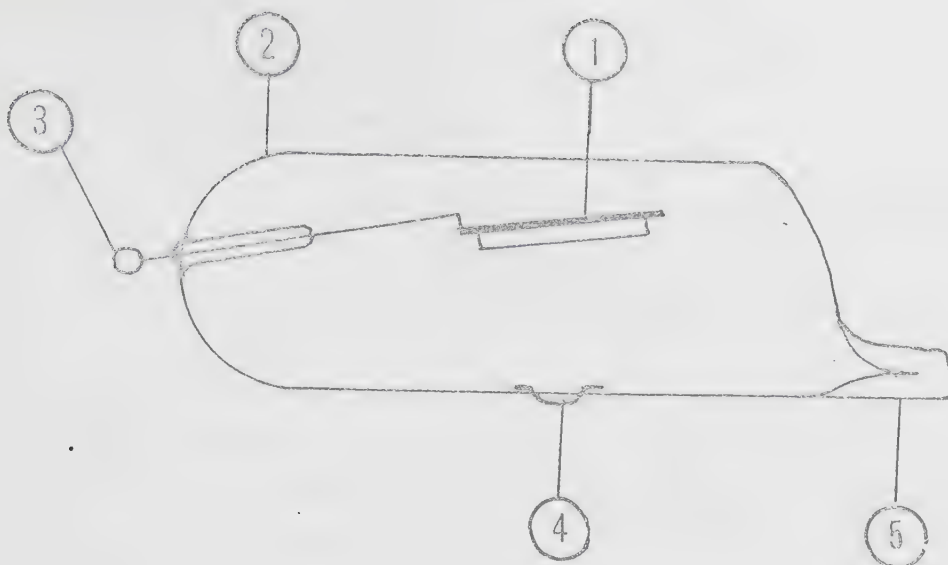
Pour ouvrir une enceinte comportant un scellement verre-métal, une solution pratique consiste à provoquer un décollement du scellement par torsion réciproque du verre sur le métal. Ce décollement se fait progressivement pour éviter des tensions mécaniques brusques, génératrices de projections de verre. Cette solution a été choisie pour extraire la photocathode de son ampoule.

La photocathode est composée d'un ménisque (4) sur lequel est déposée la couche photoémissive. Elle est solidaire d'une pièce en forme de pontet (3). Une glissière (8) fixée à deux couronnes en Kovar (2) la maintient dans l'ampoule. Une pression sur l'ampoule (9) provoque un décollement du scellement verre-métal, et par gravité, la partie (9) tombe. On a alors accès à l'intérieur de l'ampoule.

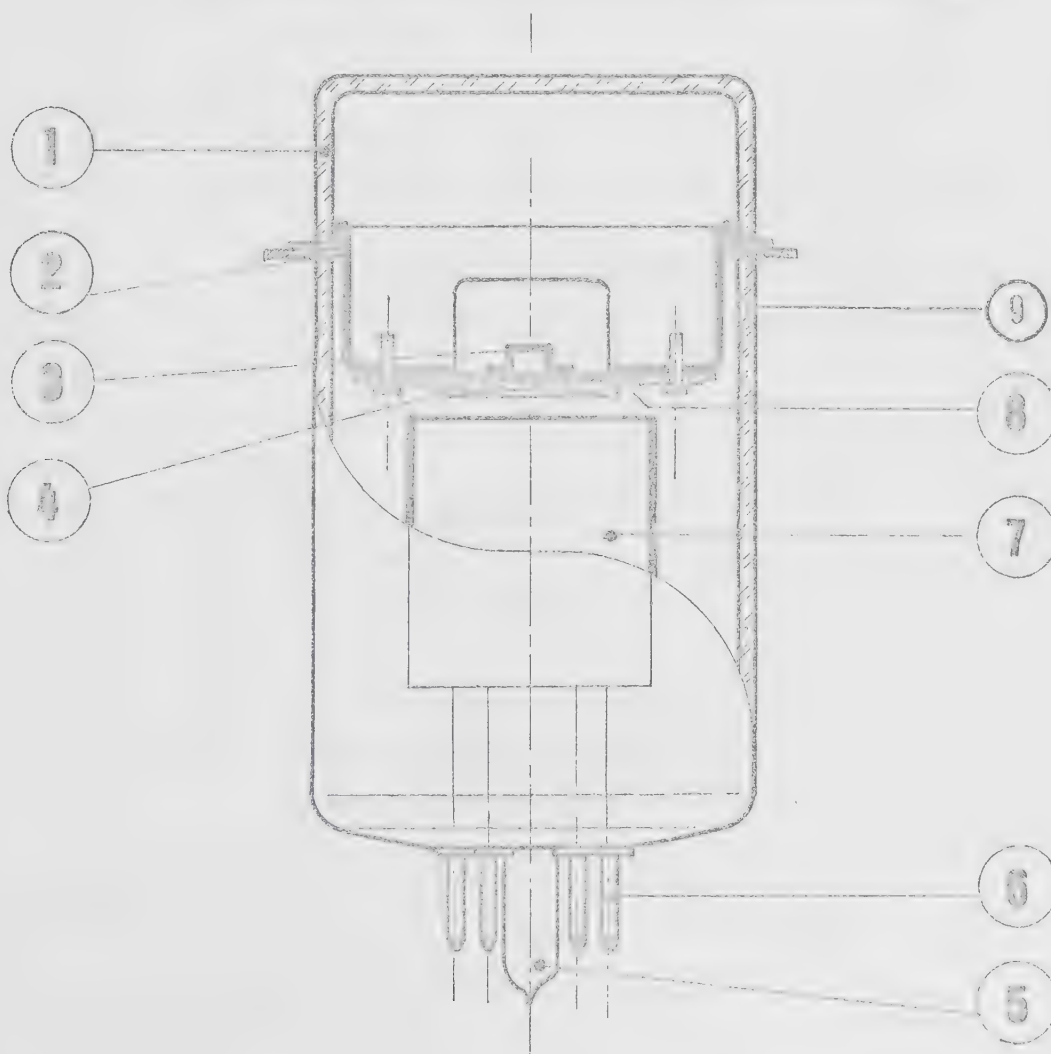
### 2.2.2. - Introducteur

Cet ensemble permet de prendre la photocathode à l'intérieur de l'ampoule, de la translater sur la cathode de l'optique électronique et d'assurer son verrouillage. Il est composé d'un "pot" d'introducteur qui permet  
.../...





( Fig. 13 ) Photocathode du type Observatoire de Paris.



Echelle: 1

( Fig. 14 ) Photocathode du type R.T.C.



le transfert de la photocathode. Il est placé entre le groupe de pompage et la caméra électronique. La préparation d'une expérience oblige une remise à l'air du système. Il implique donc un étuvage de l'ensemble en évitant de chauffer la photocathode.

### 2.2.3. Description du pot d'introducteur de photocathodes du type R.T.C. (fig. 15)

- ( 1 ) circulation d'eau servant à refroidir l'ampoule de photocathode (3) en cours d'étuvage .
- ( 2 ) Bride reliée à la caméra électronique
- ( 3 ) Ampoule de photocathode
- ( 4 ) Fil servant à mesurer la sensibilité de la photocathode pendant l'étuvage
- ( 5 ) Cryostat d'azote liquide
- ( 6 ) Bride reliée au groupe de pompage
- ( 7 ) Soufflet en acier inoxydable
- ( 8 ) Bride reliée au système de transfert
- ( 9 ) Bride fermant le pot d'introducteur
- (10) Circulation d'eau
- (11) Hublot
- (12) Passage courant
- (13) Dispositif de décollement du scellement verre métal.

### 2.2.4. Description des systèmes de translations;

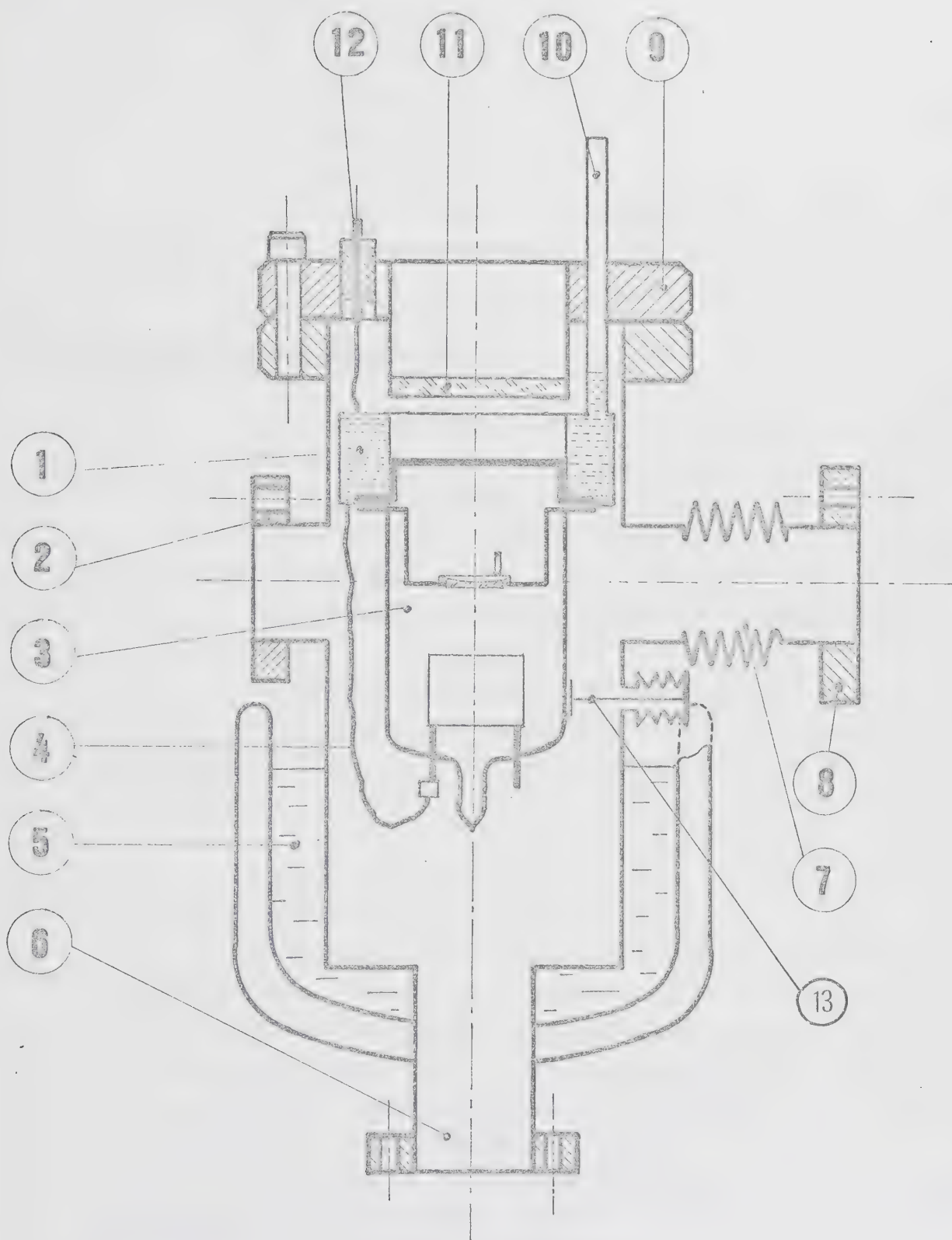
#### a) Translation par vis sans fin (fig. 16 A)

- ( 1 ) Pince
- ( 2 ) et (3) Dispositif de commande de la pince
- ( 4 ) Soufflet
- ( 5 ) Commande d'ouverture de la pince
- ( 6 ) Barres de guidage
- ( 7 ) Manivelle d'entraînement
- ( 8 ) Vis sans fin
- ( 9 ) Soufflet à diaphragmes soudés
- (10) Bride reliée au "pot" d'introducteur.

L'ouverture de la pince se fait par un déplacement relatif de la tige et du tube. La translation de la pince est due à la rotation de la vis sans fin.



# "POT" D'INTRODUCTEUR



( Fig. 15 )



b) Translation par bobines magnétiques (fig. 16 B)

- (1) Pince
- (2) et (3) Dispositif de commande de la pince
- (4) et (5) Masselottes en fer doux.
- (6) Bobines magnétiques
- (7) Tube en verre
- (8) Bride reliée au "pot" d'introducteur

Le déplacement relatif des masselottes (4) et (5) provoque l'ouverture de la pince. Sa translation étant assurée par leur déplacement commun.

### 3 / ALIMENTATION HAUTE TENSION /

L'alimentation Samès, habituellement utilisée avec la caméra électronique Lallemand ne peut l'être dans les nouvelles conditions d'emploi.

Son bon fonctionnement dépend du milieu ambiant.

Son poids de 70 kg, et son encombrement important la rendent inutilisable en ballon.

Une nouvelle alimentation, étudiée par J.BEREZNE [19] remédie à ces inconvénients.

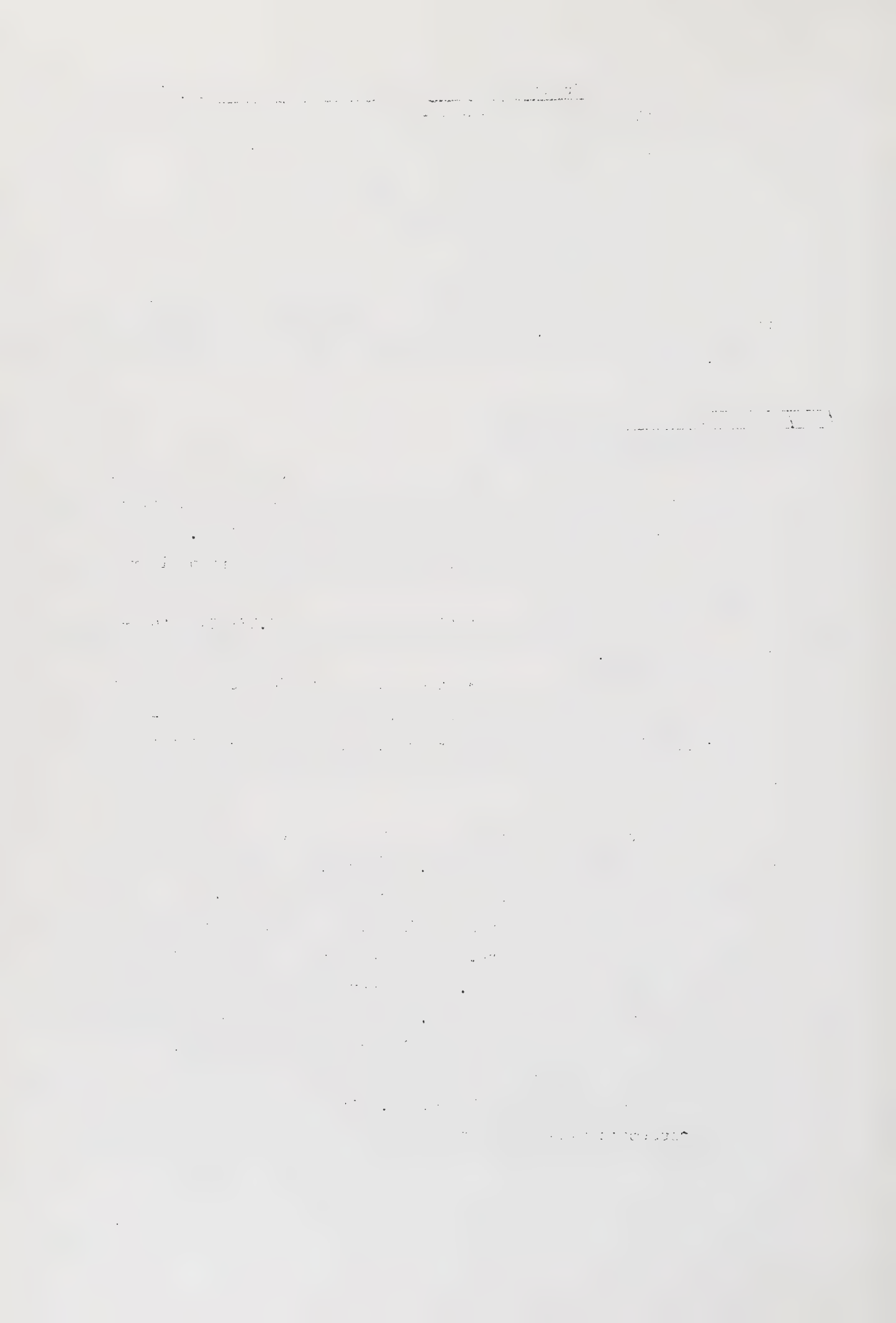
En appelant  $V$  le potentiel de la cathode, et  $v$  le potentiel de l'électrode intermédiaire (champignon), l'anode (cône et porte-plaques) étant reliée à la masse, le rapport de tension peut être défini par

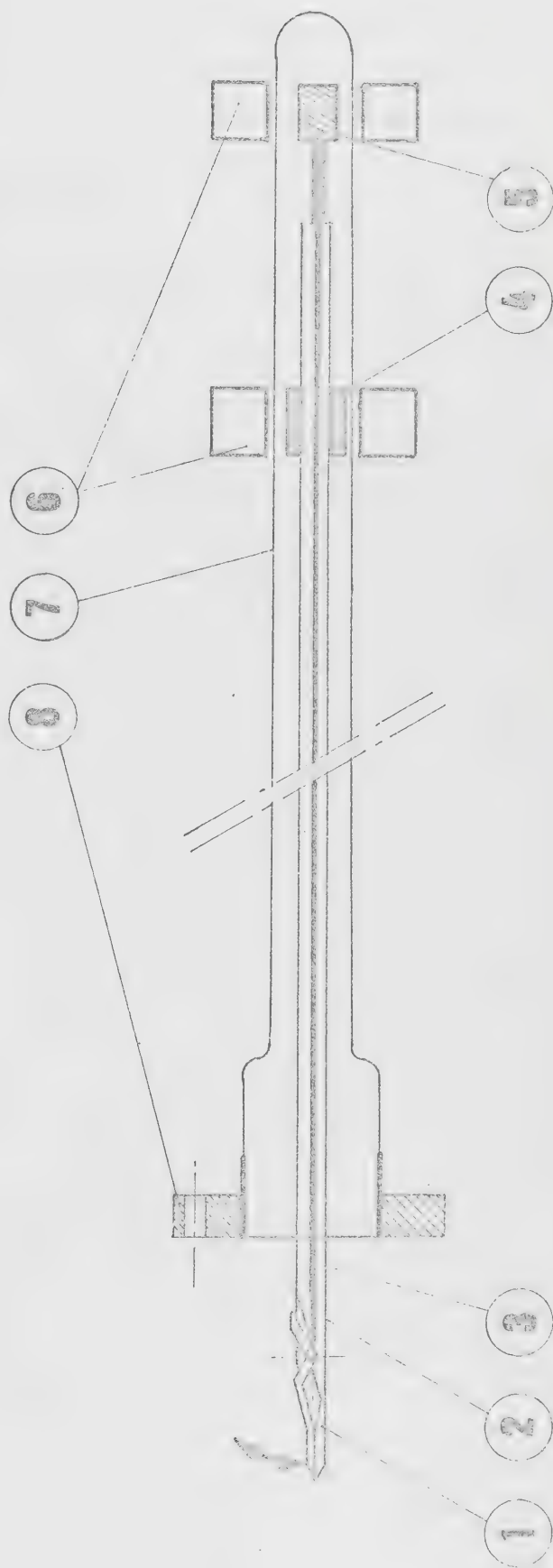
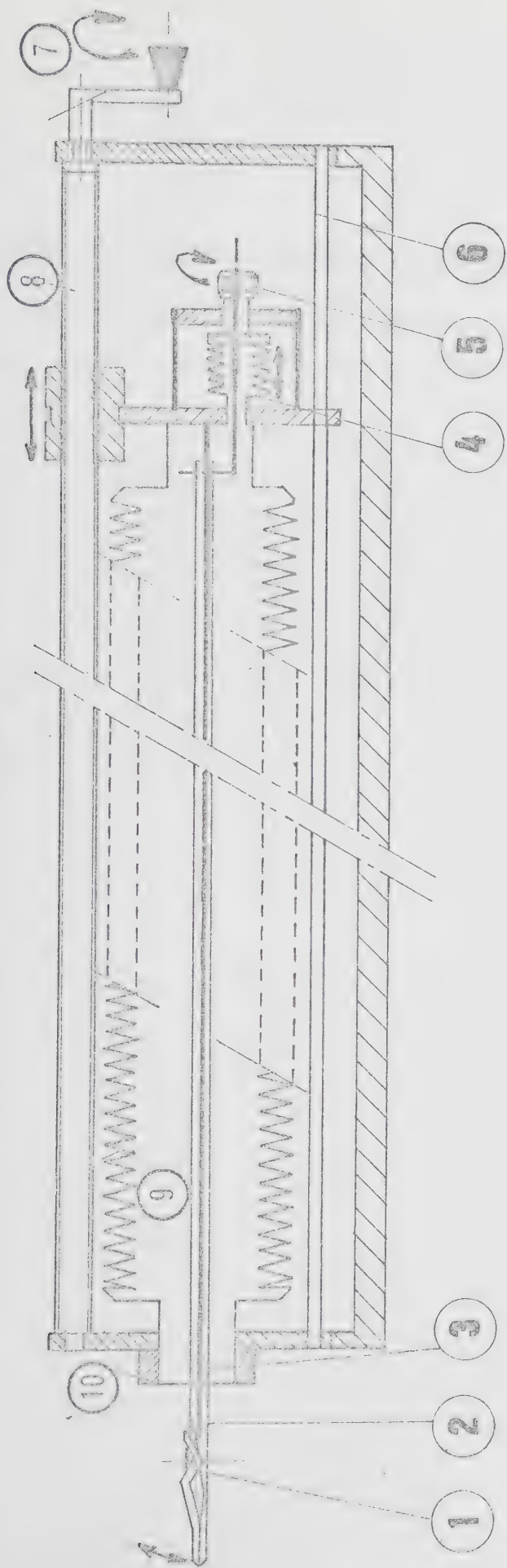
$$r = \frac{y - v}{v}$$

$V$  étant de l'ordre de - 30 kV, et  $v$  voisin de - 20 kV, le rapport  $r$  doit être stabilisé à  $3 \cdot 10^{-3}$  près.

Un générateur fournit une tension régulée de - 30 kV. Le potentiel intermédiaire  $y$  est pris en dérivation, ce qui fait qu'une variation de  $V$  ne modifie pas le rapport. Un potentiomètre permet de régler le rapport  $r$  en modifiant la valeur de  $v$ . Par construction, il est possible de programmer une montée lente en tension. Avant utilisation sur la caméra, on peut obtenir une surtension de façon à "former" les électrodes.

Pour conserver la stabilité du rapport, une partie du générateur haute tension est thermostaté à  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . L'isolement électrique vis à vis de l'environnement extérieur est réalisé par un enrobage au silasthène.







Cette alimentation en haute tension a un poids total inférieur à 5 kg et un encombrement réduit. Sa consommation totale est de 5 watts environ. Ceci lui donne une autonomie de 5 heures avec deux batteries Cadmium nickel de 960 g (elle peut également fonctionner sur secteur).

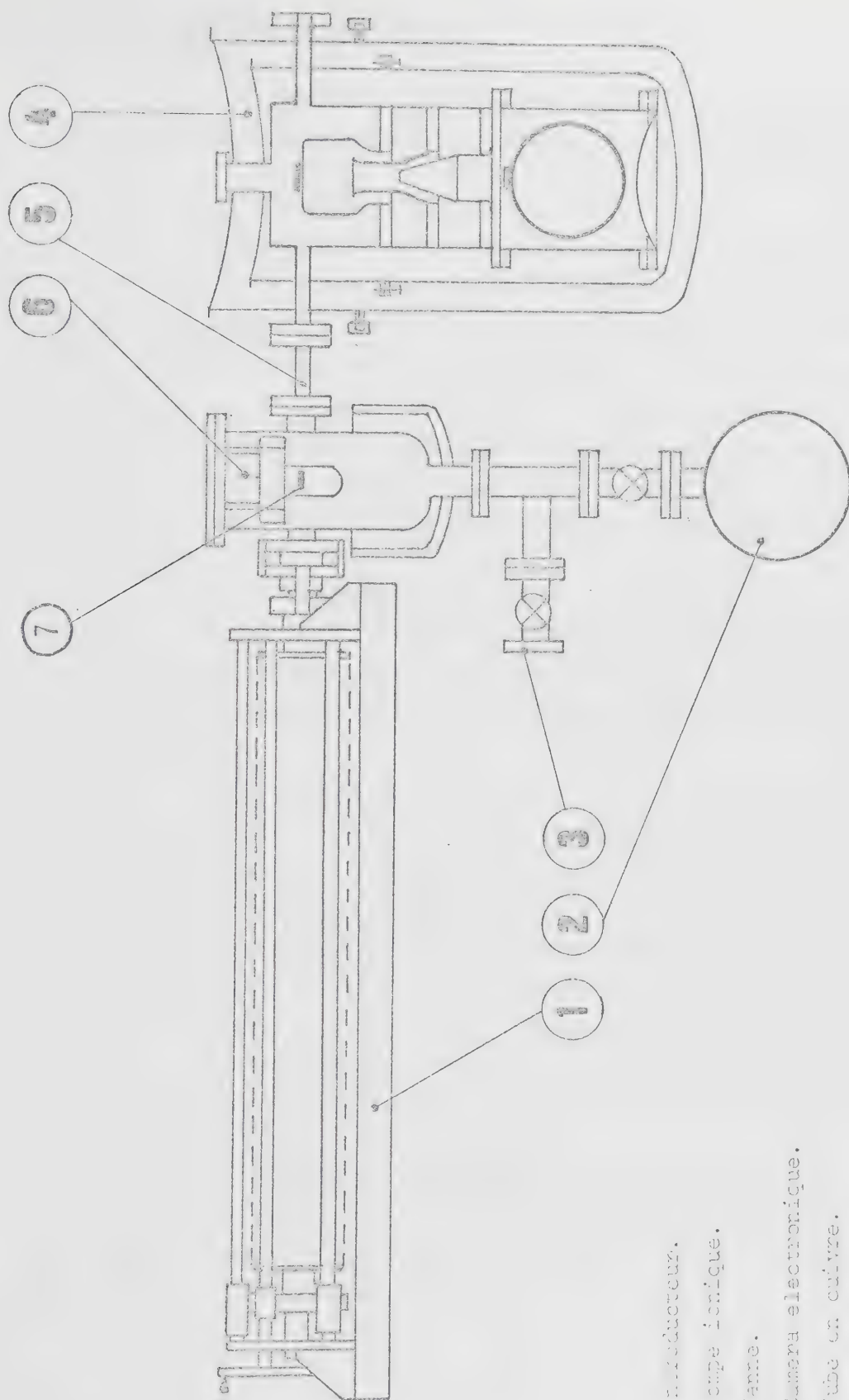
#### / 4/ DESCRIPTION DE LA PREPARATION D'UNE CAMERA /

Pour préparer une caméra, on réalise le montage semblable à la figure 17. Avec un détecteur à fuite, on vérifie l'étanchéité de l'ensemble.

On procède ensuite à l'étuvage de l'ensemble introducteur, la caméra restant à température ambiante. Après étuvage, la vanne (3) est fermée, et l'ensemble introducteur-caméra est mis en communication avec la pompe ionique (2). Le cryostat du pot d'introduction (6) et celui de la caméra électronique (4) sont alors remplis d'azote liquide, et la photocathode (7) est transférée. Le sertissage du tube en cuivre (5) rend la caméra électronique indépendante et prête à fonctionner.



# MONTAGE



- (1) Introduction.
- (2) Pompe ionique.
- (3) Vanne.
- (4) Camera électronique.
- (5) Tube en cuivre.
- (6) "Tef" d'introduction.
- (7) Photocathode.

( Fig. 17 )



## 5 RESULTATS OBTENUS EN LABORATOIRE

Nous présentons les premiers résultats obtenus pendant la période de mise au point de ce nouveau modèle de caméra électronique. Lallemand.

### 5.1 - Pression (fig. 18)

Le montage de cette expérience est semblable à celui qui est schématisé sur la figure 17. L'introducteur est étuvé à 400°, à l'exception du pot d'introduction dont la température est voisine de 200°C, la photocathode étant maintenue aux environs de 50°C. Au retour à température ambiante, la pression lue à la pompe ionique est de quelques  $10^{-6}$  torr.

Le cryostat étant rempli d'azote liquide, en quinze minutes environ, la pression diminue jusqu'à une valeur de quelques  $10^{-8}$  torr en 30 minutes. Une heure après, la pression est de quelques  $10^{-9}$  torr.

### 5.2 - Température (fig. 19)

a) Un thermocouple (fer-constantan), étant placé dans les mêmes conditions que la photocathode sur la cathode de l'optique électronique, indique la température de l'azote liquide (- 196°C) après une heure de refroidissement.

b) Un thermocouple fixé à la place d'une plaque nucléaire indique - 130°C au bout de 4 heures, - 170°C au bout de 7 heures et il faut attendre 10 heures pour atteindre - 190°C. La grande impédance du montage explique la longue durée du refroidissement.

Une amélioration certaine sera obtenue en liant le barillet du porte-plaques à un point à la température de l'azote liquide par une tresse en fils d'argent.

Par ailleurs, un noircissement des surfaces du porte-plaques améliorera les échanges thermiques.

### 5.3 - Tenue en sensibilité des photocathodes

Les essais ont été effectués sur deux types de photocathodes : les photocathodes du type "Observatoire de Paris" et les photocathodes du type "R.T.C." (décrites en III.2).

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

1911

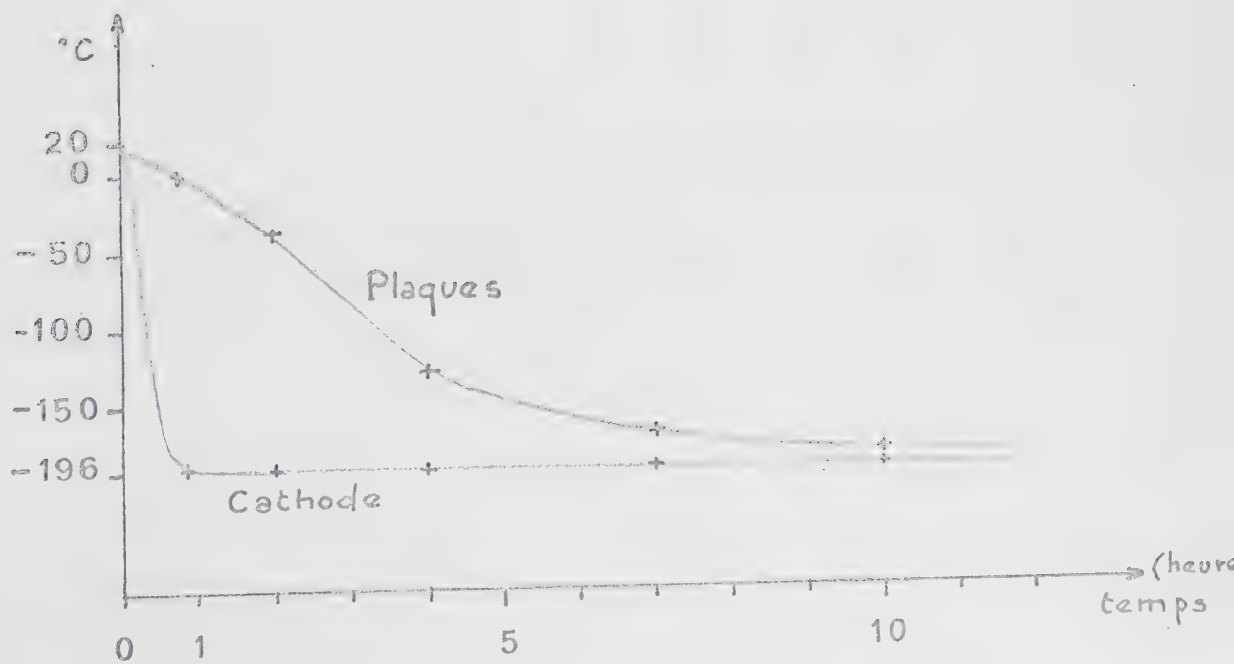
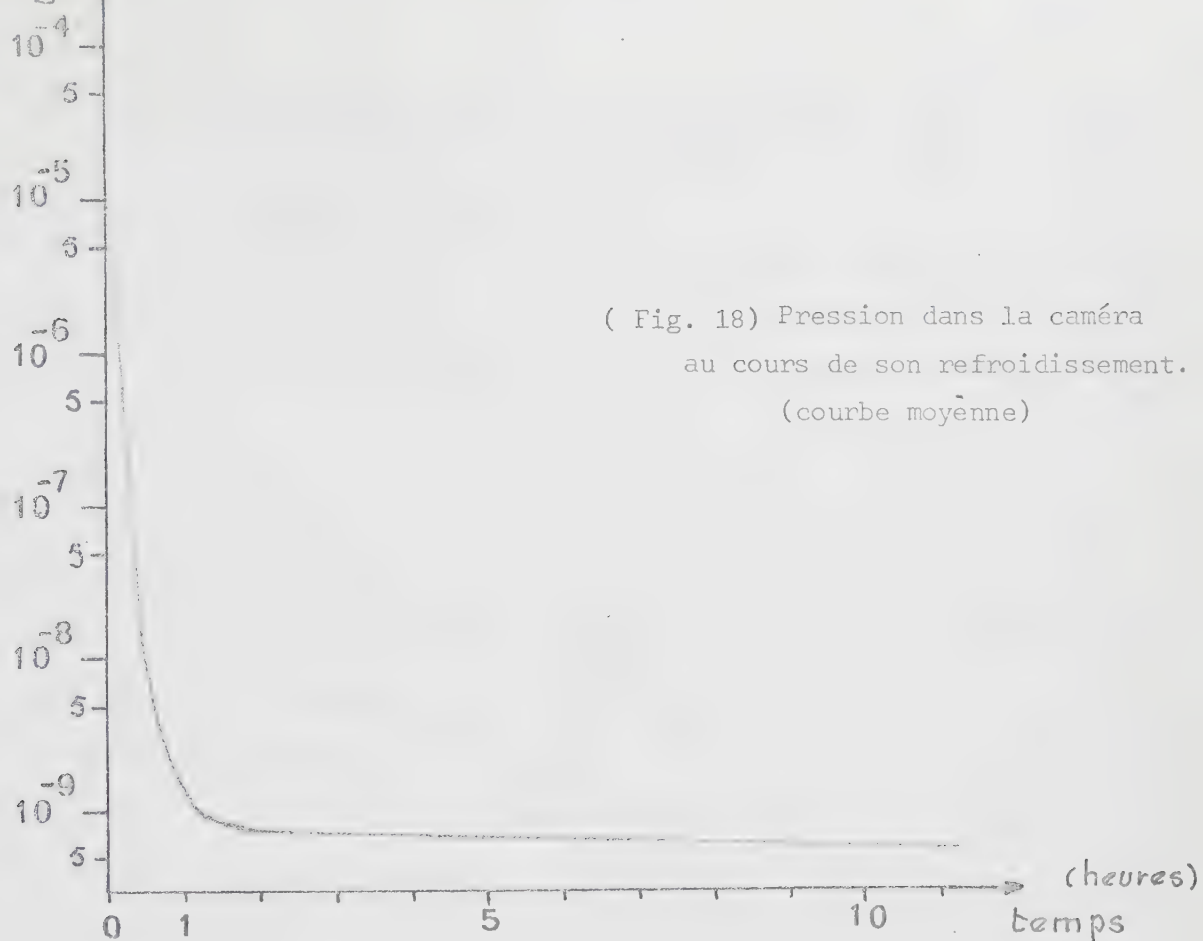
1911

1911

1911

1911

Pression  
(mm Hg)



( Fig. 13 ) Refroidissement de la cathode et des plaques nucléaires



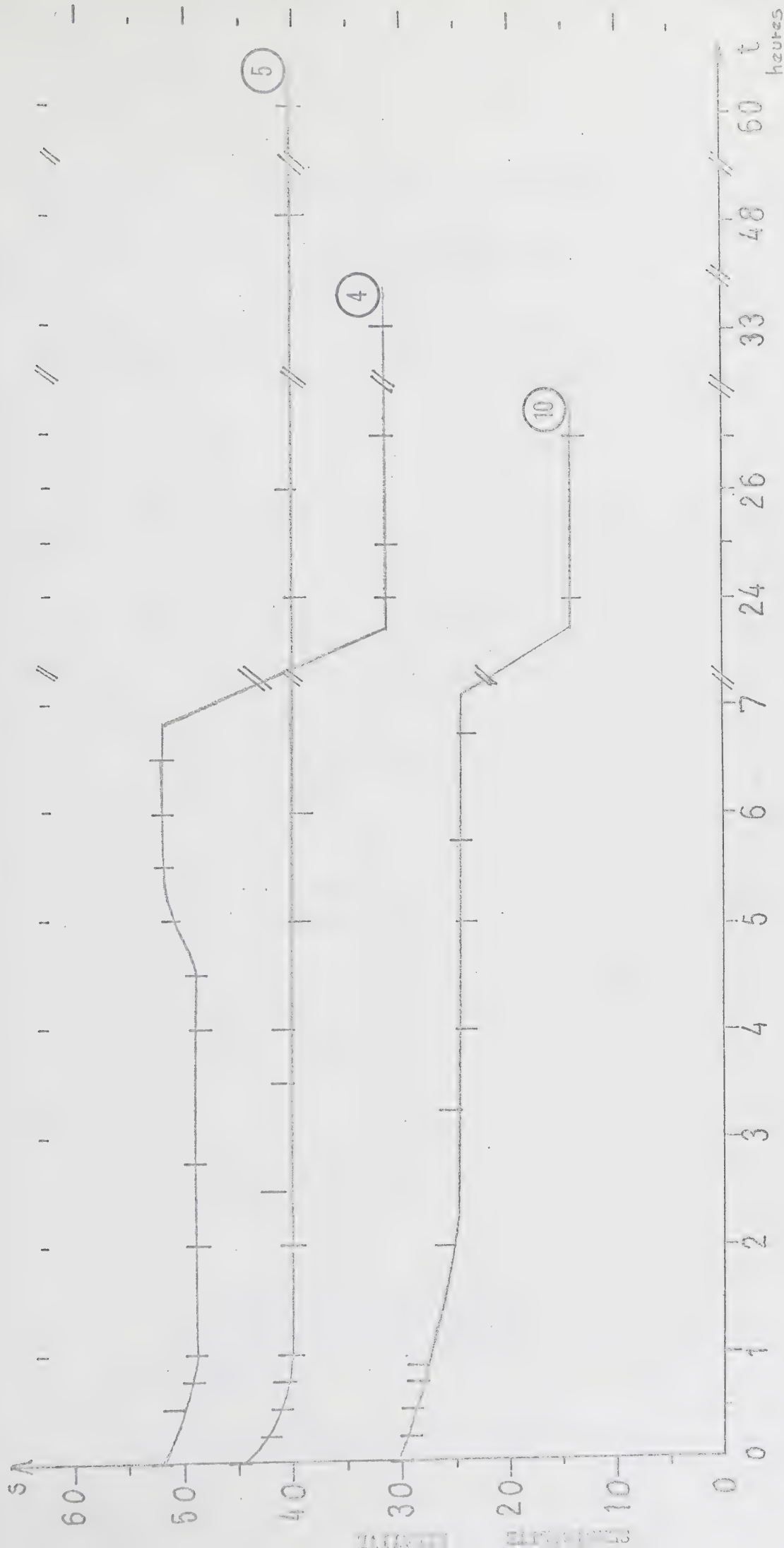
a) Photocathode S 11 du type "Observatoire de Paris. (fig. 20)Conditions d'expériences :

La caméra électronique n'est pas étuvée, elle est immergée dans l'azote liquide au moment du transfert de la photocathode.

Ce transfert est effectué à l'aide de l'introducteur en verre.

|                                                                                                        |                    |                    |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Manipulation n°                                                                                        | 4                  | 5                  | 10                 |
| Temps d'étuvage du système<br>introducteur en heures                                                   | 5                  | 7                  | 7                  |
| Pression, à la pompe ionique<br>au moment du transfert, en<br>Torr                                     | $2 \times 10^{-9}$ | $4 \times 10^{-9}$ | $2 \times 10^{-9}$ |
| Sensibilité dans l'ampoule<br>(valeur relative)                                                        | 55                 | 55                 | 35                 |
| Sensibilité de la photocathode<br>de à son arrivée sur la cathode<br>de de la caméra (valeur relative) | 52                 | 45                 | 30                 |
| Durée du transfert en minutes, de<br>l'ampoule à la cathode de l'optique<br>électronique               | 5                  | 20                 | 26                 |





( Fig. 20 ) SENSIBILITE DES PHOTOCATHODES EN FONCTION DU TEMPS (Type Observatoire de Paris) (911)

Remarque : La perte de sensibilité des photocathodes (4) et (10) correspond à un réchauffement de la cathode d'environ 1°C.

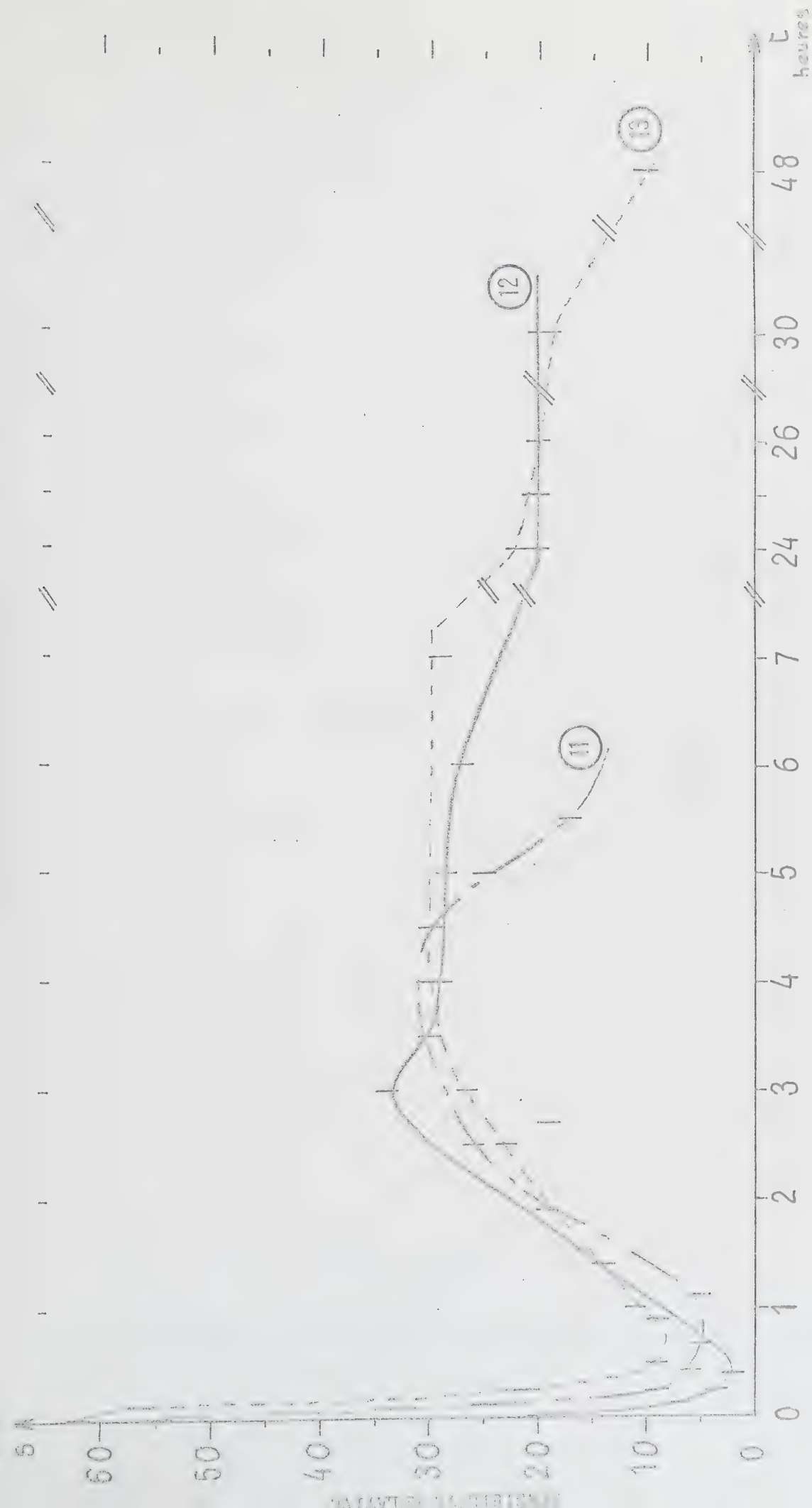


b) Photocathodes S 11 du type "R.T.C." (fig. 21)Conditions d'expériences

La caméra électronique n'est pas étuvée, elle est immergée dans l'azote liquide au moment du transfert de la photocathode. Ce transfert est effectué au moyen de l'introducteur en verre et du "pot" métallique.

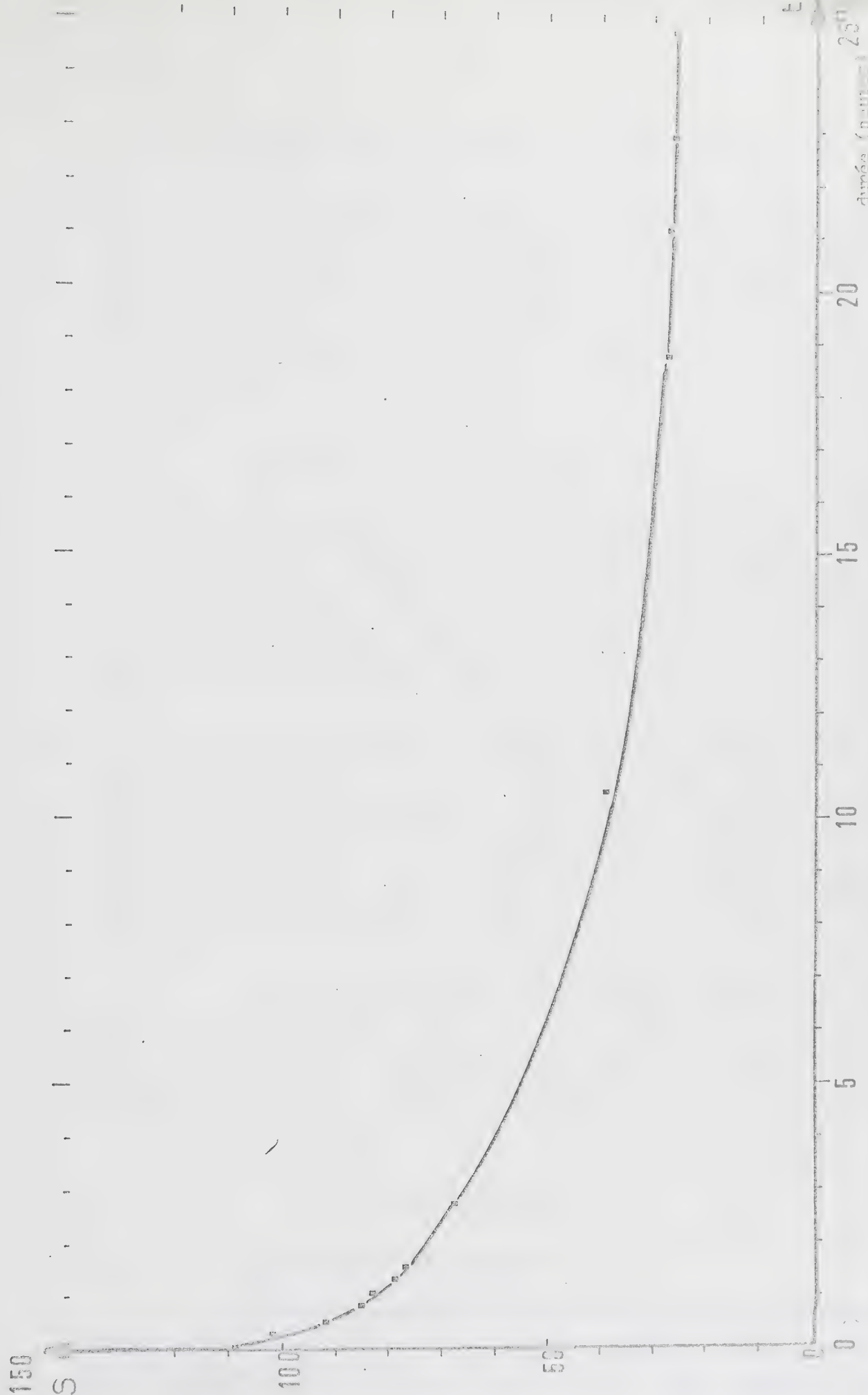
| Manipulation n°                                                                             | 11                 | 12                 | 13                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Refroidissement de l'ampoule dans le "pot" métallique avant le transfert de la photocathode | oui                | oui                | non                |
| Temps d'étuvage du système introducteur en heures                                           | 11                 | 8                  | 6                  |
| Pression, à la pompe ionique, au moment du transfert, en Torr                               | $1 \times 10^{-8}$ | $6 \times 10^{-9}$ | $3 \times 10^{-9}$ |
| Sensibilité dans l'ampoule avant le transfert (valeur relative)                             | 80                 | 35                 | 65                 |
| Sensibilité de la photocathode à son arrivée sur la cathode de la caméra (valeur relative)  | 57                 | 20                 | 62                 |
| Durée du transfert en minutes (de l'ampoule à la cathode à l'optique électronique)          | 16                 | 14                 | 13                 |





( Fig. 21) SENSIBILITE DES PHOTOCATHODES EN FONCTION DU TEMPS (Type RTC) (S11)





SENSIBILITE (unités arbitraires)

Fig. 21bis) EVOLUTION DE LA SENSIBILITE D'UNE PHOTOCATHODE RTC - S20 EN FONCTION DU TEMPS



c) Photocathode du type "R.T.C." (S 20). (fig. 21 bis)

Pendant l'étuvage, l'introducteur entièrement métallique était à une température de 300°C, tandis que celle de la caméra électronique ne dépassait pas 100°C. Au moment du transfert, la pression lue à la pompe ionique était de  $10^{-9}$  torr. Au cours du transfert, la sensibilité de la photocathode a diminuée de 10 %. La variation de la sensibilité en fonction du temps suit la courbe de la figure 21 bis, (dans son ampoule d'attente, la sensibilité était de 34 mA/W à 5200°A).

d) Remarques

. La sensibilité des photocathodes de l'Observatoire de Paris diminue, pendant la première heure, de 6 à 10 %. Ensuite elle est stable aussi longtemps que la caméra est maintenue froide. La diminution brutale qui intervient au bout de 10 heures sur la sensibilité des photocathodes (4) et (10) est due à un manque d'azote liquide dans le cryostat, ce qui a provoqué un réchauffement de l'optique électronique.

.. La sensibilité des photocathodes R.T.C. diminue brutalement jusqu'à une valeur voisine de zéro, en 30 minutes environ. Ensuite, cette sensibilité remonte jusqu'à une même valeur, quelque soit la sensibilité d'origine, et décroît ensuite lentement. Les conditions d'introduction étant identiques à celles des photocathodes précédentes, le mode de fabrication différent de la couche photoémissive doit entraîner des mécanismes chimiques variables selon l'excès de césium.

... Les résultats obtenus avec les photocathodes S 11 de type Observatoire de Paris montrent que la tenue en sensibilité est conservée dans le nouveau modèle de caméra non étuvé et refroidi à l'azote liquide. Des essais sont en cours avec des photocathodes S 1.

## 5.4 - Résolution

### 5.4.1. Courbure de champ

a) Conditions d'expérience (fig. 22)

L'optique électronique (4) est adaptée à un écran fluorescent (6) par l'intermédiaire d'une bride à joint de plomb (5), serrée par un collier Veeflex. Le haut de la caméra comporte un hublot étuvable Varian (1).

.../...



L'écran fluorescent se déplace suivant l'axe optique grâce à la rotation d'une vis graduée (8).

L'écran fluorescent est à la masse, le champignon a le potentiel (v) et la cathode le potentiel (V). Ils sont reliés à l'alimentation de haute tension (11). Un sac en plastique (12) entoure l'optique électronique. On y envoie en permanence un courant d'azote gazeux afin de réduire les courants de fuite à quelques nA.

Sur la photocathode (3) est projeté un système de franges de Moiré (13) obtenues à l'aide de deux réseaux traversés par un faisceau Laser.

L'orientation relative des réseaux permet d'avoir un pas variable. Les franges n'étant pas localisées, aucune mise au point sur la photocathode n'est nécessaire.

Pour plus de commodité, l'image reçue sur l'écran fluorescent est reprise par un objectif (10) travaillant au grandissement de -1. On examine l'image finale au moyen d'un microscope monté sur une platine micrométrique à trois degrés de liberté (9).

#### Remarques :

. La caméra et l'introducteur de photocathodes du type Observatoire de Paris, ont été étuvés sur une pompe ionique pendant 48 heures. Au moment du transfert de photocathode, la pression était de quelque  $10^{-10}$  torr.

.. La photocathode utilisée était "non pénétrante", et le diamètre du ménisque en verre était de 18 mm pour un diamètre de cathode de 20 mm.

#### b) Détermination des focales sagittale et tangentielle.

On projette sur la photocathode des franges au pas de  $30 \mu$  ( $30 \text{ dt/mm}$ ). On recherche le rapport de tension donnant la meilleure mise au point pour une position donnée de l'écran fluorescent. Puis, en laissant ce rapport de tension fixe, on déplace l'écran en repérant, sur un diamètre de la photocathode, les coordonnées des points pour lesquels l'image devient floue :

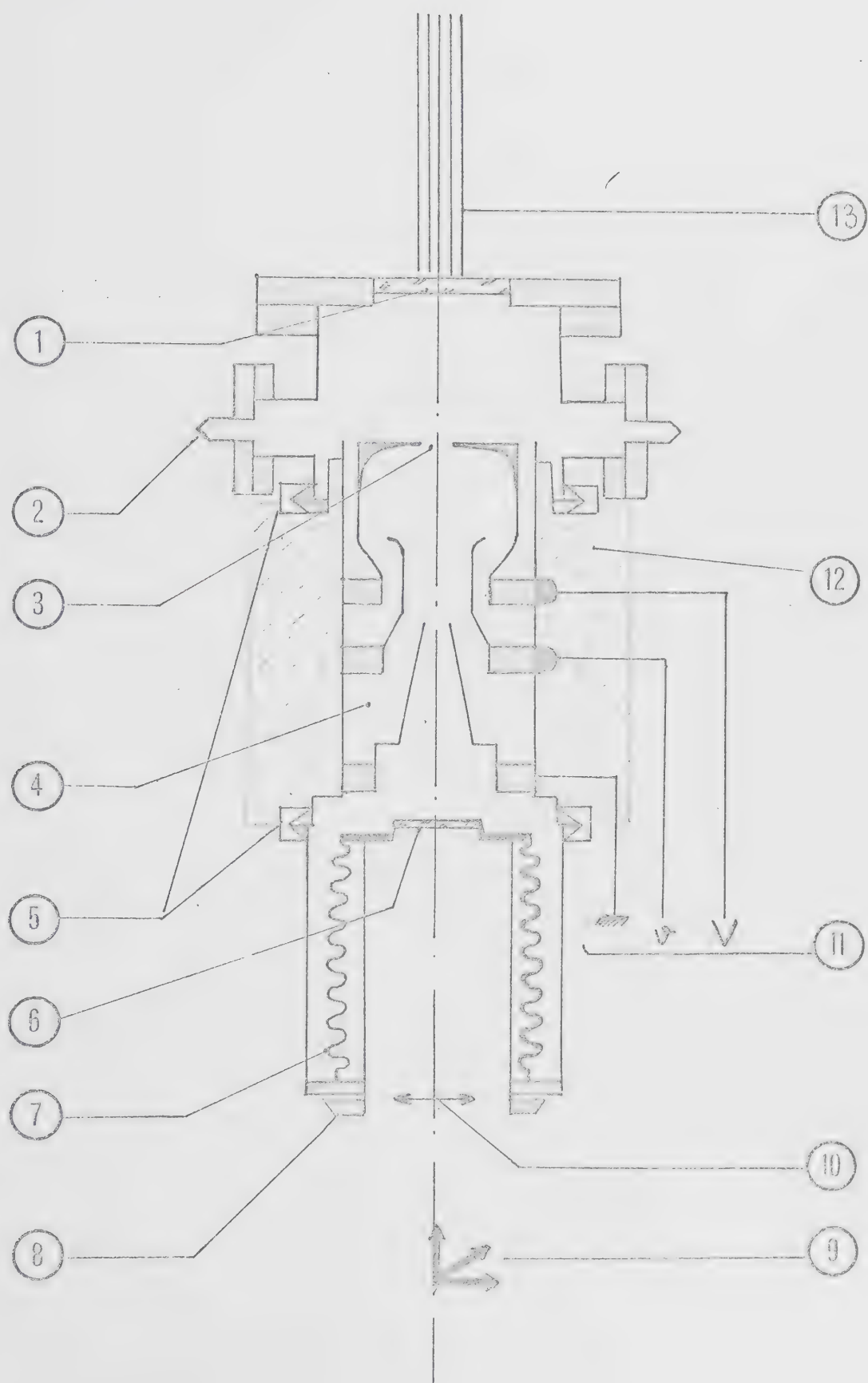
- on génère ainsi deux surfaces d'égale défaut de mise au point. La focale recherchée est équidistante de ces deux surfaces.

- La focale tangentielle est obtenue par l'exploration du diamètre de la photocathode, perpendiculaire au système de franges.

.../...



# MONTAGE AVEC ECRAN FLUORESCENT

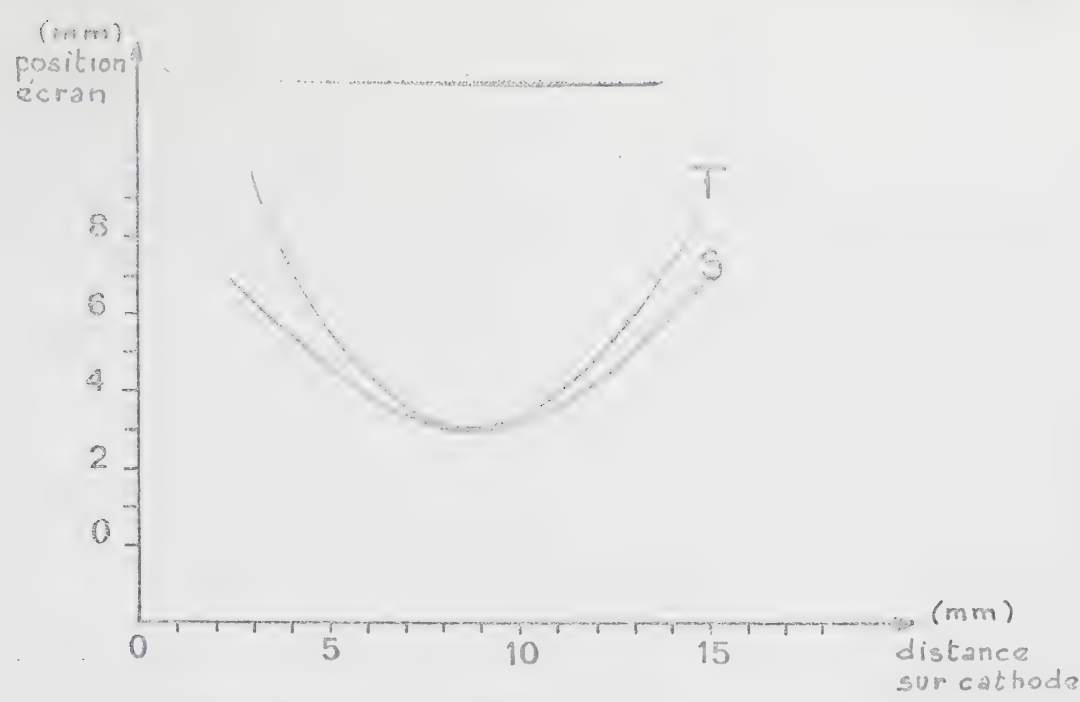


( Fig. 22 )

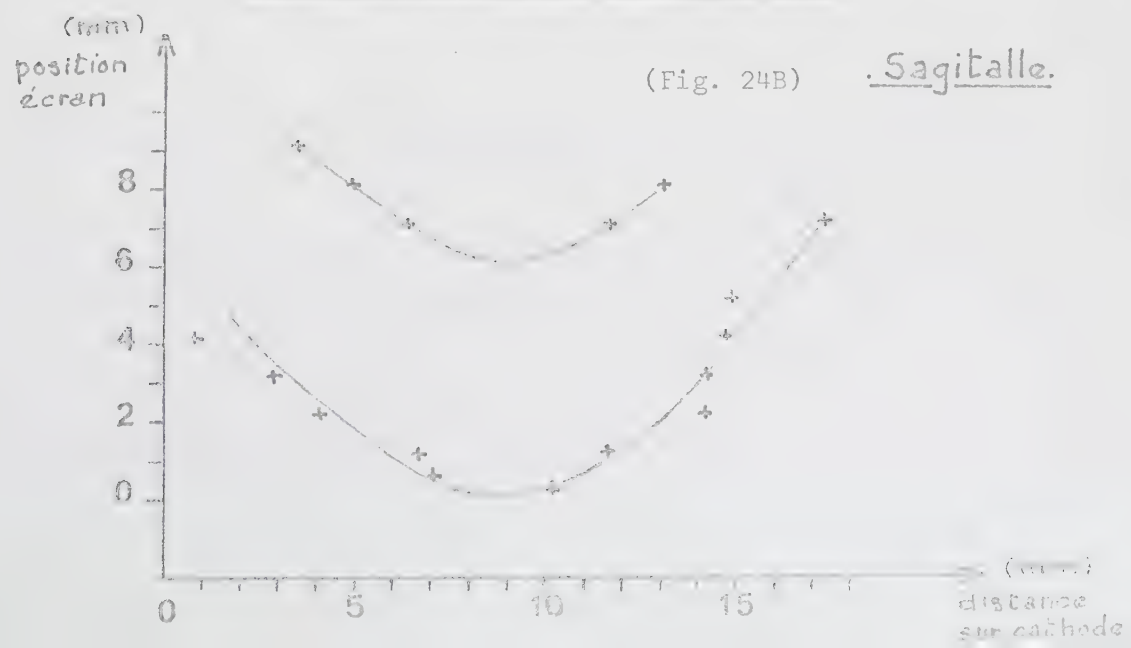
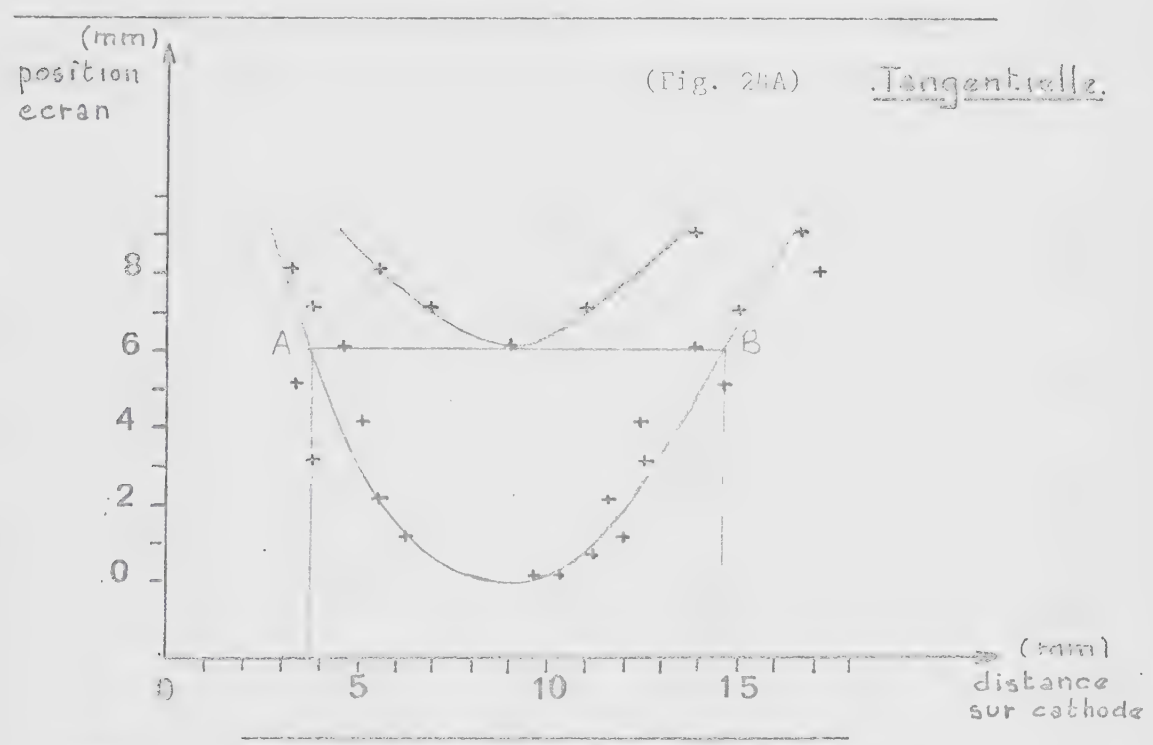




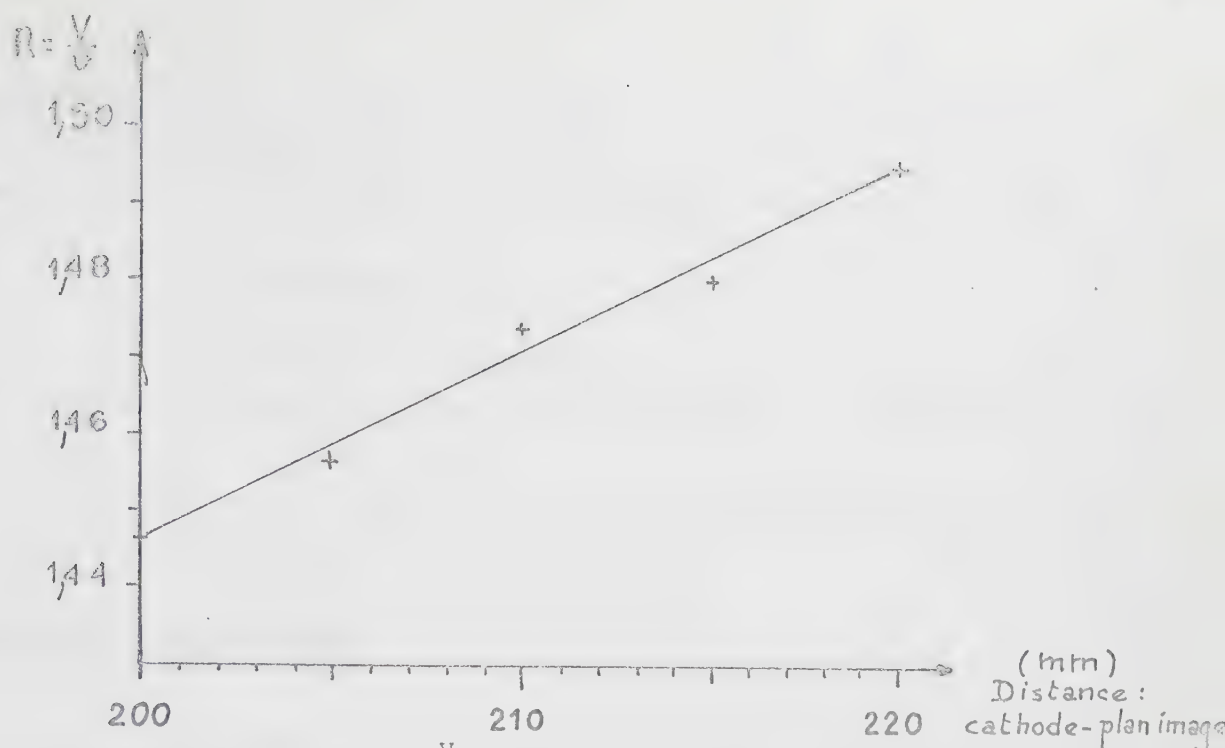




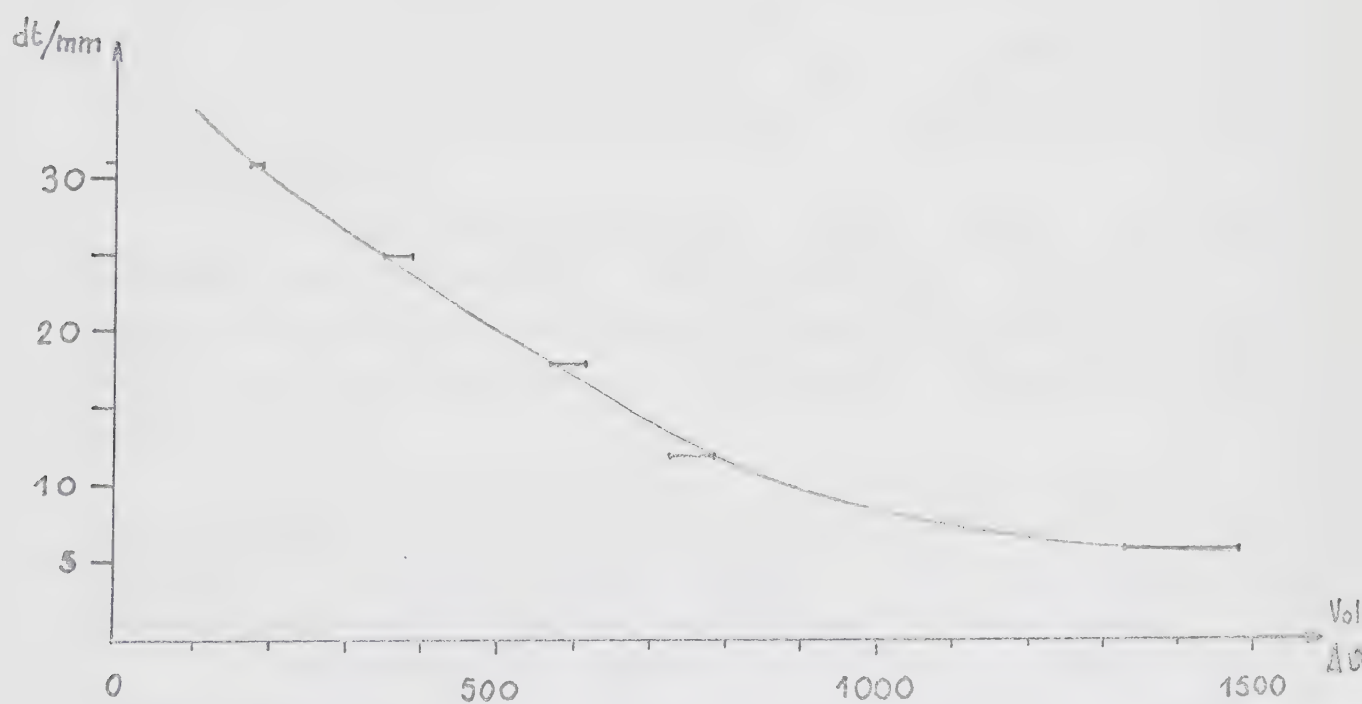
(Fig.23) FOCALES TANGENTIELLE ET SAGITALE







(Fig. 25) Variations de  $R = \frac{V}{V_0}$  en fonction de la distance cathode - plan image



(Fig. 26) Variations de la profondeur de champ en tension en fonction de la résolution.



dont la sensibilité, au cours de la pose, avait 25 % de la valeur d'origine soit 8,5 mA/W à 5000 Å. Pour une heure de pose sur une plaque Ilford G5, avec une tension d'accélération de 26 kV, la densité obtenue est  $d = 0,025$ .

#### 5.6 - Autonomie

La perte d'azote liquide est de 0,5 litre par heure, ce qui assure une autonomie d'une dizaine d'heures avant un nouveau transfert d'azote liquide.

Un cryostat mieux étudié, diminuant les pertes thermiques doit améliorer ces performances.

### / 6 / RESULTATS ASTROPHYSIQUES /

La caméra électronique céramique-métal a été utilisée pour la première fois dans une expérience d'astrophysique pendant la mission d'éclipse totale du soleil au Mexique en Mars 1970 [20].

L'objectif de cette observation était d'étudier simultanément la distribution de brillance pour plusieurs raies d'émission, leur polarisation et leur continu voisin, par photographie directe de la couronne solaire au travers de filtres interférentiels. Les qualités photométriques et le gain en temps de pose de la caméra électronique sont particulièrement mis à profit dans cette expérience.

Le dispositif expérimental est constitué de deux voies identiques comprenant chacune : une lunette, un dispositif optique intermédiaire et une caméra électronique. Pour la raie verte on emploie une photocathode du type R.T.C., pour la raie infra-rouge on utilise une photocathode du type Observatoire de Paris.

La brève durée de l'éclipse (3 minutes) nécessitait une programmation de l'ensemble de l'opération. L'obturateur, les filtres la lunette équatoriale et la rotation du porte-plaques de la caméra électronique, sont commandés automatique. (Programmation réalisée par le Groupe Caméra).

Les conditions d'expériences étaient absolument inhabituelles : température moyenne de 35°, poussière, insectes, etc... Elles ont soumis le matériel à rude épreuve. Le groupe de pompage et le détecteur de fuites, non tropicalisés, avaient des rendements réduits. Il en était de même des groupes électrogènes (seule alimentation électrique), dont la puissance était souvent insuffisante au cours de la préparation des caméras électroniques. L'environnement imposait des conditions de manipulation très difficiles par rapport aux

.../...



conditions normales d'utilisations de la caméra électronique. Par sécurité, vis-à-vis de la tenue en sensibilité des photocathodes, il fallait effectuer l'opération d'introduction de photocathodes quelques heures seulement avant l'heure imposée par l'éclipse.

Sur la voie infrarouge, à la fin de l'opération d'introduction de la photocathode, le tube en cuivre n'a pu être serti complètement. Il a fallu couper le cuivre écrasé à l'aide d'une lame de rasoir. Cette coupure n'a pu être réalisée convenablement, et a provoqué une entrée d'air dans la caméra, annulant irrémédiablement la sensibilité de la photocathode.

Sur la voie visible, les opérations se sont bien déroulées, et la caméra électronique a pu être montée sur la table équatoriale dans les temps imposés.

#### - Résultats techniques

En dépit du nombre insuffisant de répétitions, les caméras céramique-métal ont bien fonctionnées. L'accident arrivé pendant le sertissage du tube en cuivre ne remet pas en cause le principe de ce modèle de caméra. Il relève plutôt d'une maladresse que d'une incomptabilité de fonctionnement.

#### - Résultats astrophysiques

Le fait qu'une seule caméra ait été utilisée pendant l'éclipse, a donné des résultats incomplets : leur intérêt a donc été limité. Sur la voie visible, les clichés obtenus permettent de donner la largeur équivalente de la voie verte, l'abondance du fer et une indication sur la polarisation de cette voie verte dans la très basse couronne.

- L'ensemble des résultats permettent de concevoir une expérience plus complète. Certaines améliorations techniques doivent assurer une plus grande fiabilité de ce récepteur. Il sera de nouveau utilisé pour l'éclipse totale du soleil au SAHARA en juin 1973.



#### IV / CONCLUSION /

Dans la première partie de cette étude, nous avons décrit le principe et les caractéristiques de la caméra électronique Lallemand. Nous avons montré que c'est un récepteur de photons quasi parfait. Ses qualités fondamentales découlent de l'association directe de l'effet photoélectrique et de l'effet electronographique. Cette association est réalisée par des moyens ne dégradant pas les propriétés de ces deux effets. Une analyse de ces moyens a été faite dans le cas du modèle de caméra électronique construit à l'Observatoire de Paris. Elle a mis en évidence les conditions qu'ils doivent remplir : la couche photoémissive et les plaques nucléaires, refroidies à  $-140^{\circ}\text{C}$ , sont situées dans une enceinte commune où règne une pression de quelques  $10^{-9}$  torr, et où sont établis des potentiels de  $-10$  kV et  $+20$  kV. Les performances de la caméra électronique ont été exposées. En particulier : absence de bruit de fond, absence de seuil à l'enregistrement, gain sur le temps de pose et en informations par rapport aux plaques photographiques, réponse linéaire à l'enregistrement. Bien que son emploi soit courant et sûr en Astronomie, elle est, du fait de son mode de réalisation, difficilement utilisable dans certaines conditions tels que les missions d'environnement difficile, ou l'observation en ballon. L'analyse de l'origine de ces difficultés a mis en évidence les points faibles qu'il serait souhaitable de modifier. Les conditions de l'environnement influent sur le fonctionnement du récepteur : le maintien de haute tension est difficile, le tube est fragile, l'autonomie en liquide cryogénique est faible.

Dans une deuxième partie, nous avons analysé les conditions de réalisation d'une caméra électronique Lallemand. Ces conditions concernent : la conservation de la sensibilité de la couche photoémissive, l'obtention d'une très basse pression, le maintien de hautes tensions, l'établissement d'une basse température. Nous avons montré que ces conditions trouvent des solutions dans les applications d'une nouvelle technologie, celle-ci évitant les points faibles du récepteur existant.

Dans la troisième partie, sur la base des analyses précédentes, un nouveau modèle de caméra électronique Lallemand a été décrit. Son principe est basé sur l'immersion complète de l'optique électronique dans un bain d'azote liquide contenu dans un cryostat métallique.

Un environnement contrôlé, reproductible est ainsi créé. Les fonctions relatives à la haute tension, à la pression, à la température et

.../...



à l'autonomie sont ainsi remplies. Les premiers résultats obtenus en laboratoire par ce nouveau modèle ont été exposés.

Ceux obtenus au Mexique lors de l'éclipse totale de soleil en Mars 1970 ont montré que ce nouveau modèle est bien adapté aux missions d'environnement très difficile.

Quelques perfectionnements, en cours de réalisation doivent simplifier son emploi et améliorer ses résultats :

- L'inconvénient majeur de ce type de caméra électronique est la destruction de la couche photosensible quand on procède au remplacement des plaques nucléaires. Il faudrait isoler la photocathode de l'ambiance extérieure pendant cette opération.

Une vanne fonctionne aux Etats Unis [5] un autre modèle est en cours d'essais dans notre laboratoire.

- Un nouveau cryostat, ayant une plus grande autonomie, et un nouveau porte-plaques permettant de gagner sur le temps de refroidissement des plaques nucléaires, sont en cours d'études.

- Sur la base de la caméra électronique céramique-métal, la Radiotechnique, sur contrat C.N.E.S., réalise actuellement un modèle permettant l'emploi de l'hélium liquide et pouvant être embarqué dans une nacelle de ballon.



J'exprime ma reconnaissance à Monsieur P. FELENDOR  
qui a dirigé cette étude, et à tous les chercheurs et  
techniciens du Groupe Caméra Electronique de l'OBSERVATOIRE DE  
MEUDON pour leur aide amicale.



## REFERENCES

- [1] - M. COMBES "Contribution à l'étude de l'atmosphère de Jupiter" - Thèse 1960
- [2] - M. DUCHESNE - C.R. Académie des Sciences de PARIS - T.271 - p. 142 (1971)
- [3] - M. VERNIER - "Sur l'action photographique des électrons" - Thèse
- [4] - M. DUCHESNE et A. BIJAOUÏ - Nouvelle Revue d'Optique Appliquée - 1 - n° 5 - 1970
- [5] - G.E. KRON - "Advances in Electronics and Electron Physics" - 22A - p. 59
- [6] - G. WLERICK - "Advances in Electronics and Electron Physics"- 22A - p. 465
- [7] - M. DUCHESNE - Notes et Informations - XVII (1964)
- [8] - M.F. DUPRE - Diplôme d'études supérieures (1962)
- [9] - A. LALLEMAND - "Advances in Electronics and Electron Physics" - 22A - p.1
- [10] - A. LALLEMAND - M. DUCHESNE - L. GOLDZAHL - J. DUFLO - J. BANAIGS  
C.R. Académie des Sciences de Paris - t. 248 - p. 2191 (1959)
- [11] - P. BIED-CHANETON, A. BIJAOUÏ, M. DUCHESNE, J.M. LE CONTEL "Advances in Electronics and Electron Physics" - 28 A - p. 27
- [12] - G. WLERICK - "Advances in Electronics and Electron Physics" 28 B - p.790
- [13] - G.E. KRON - H.D. ABLES - A.V. HERVATT - "Advance in Electronics and Electron Physics" - 28 A - p. 1
- [14] - Mac GEE, D. MULLAN - H. BACIK - M. OLIVER - "Advances in Electronics and Electron Physics" - 28 A - p.61
- [15] - H. DOUCET - A. TRUC - A. RICHARDT - "Le Vide" - n° 132 (1967)
- [16] - R.W. DECKER - "Advances in Electronics and Electron Physics" - 28 A - p.357
- [17] - SANDS et DICK - Vacuum - 16 - n° 2 - p. 691
- [18] - A. ZEITOUN-FAKIRIS - "Décharges et isolement électriques dans le vide"  
Compte-rendu du 3° Symposium International (1968)
- [19] - J. BEREZNE - "Alimentation Haute-Tension pour caméra électronique" -  
Rapport interne du Groupe "Caméra Electronique"
- [20] - B. FORT - "Studies of Coronal Lines With Electronic Camera During the  
Eclipse of 7 March 1970" - Applied Optics 9-12 (1970)
- [21] - M.F. WALKER "Advances in Electronics and Electron Physics" 28 B - p.773
- [22] - A. COSSON "Sur la mesure expérimentale du gain de la caméra électronique  
par rapport à la photographie classique"
- [23] - SPICER et WOOTEN "Photoemissive Materials de A. SOMMER
- [24] - M. COURTEL "Le frottement dans le vide" C.N.R.S.

.../...



- Thèse DUCHESNE (Gauthier et Villars) 1953
- L'émission photoélectrique - VERNIER (Dunod)
- Revue "Le Vide" de la S.F.I.T.V.
- L'Ultra-Vide - E.A. TRENDELENBURG (Gauthier et Villars)
- Cours de Sciences et Techniques du Vide - HENRY
- Techniques et applications de l'ultra-vide - F. JUILLET (Masson)
- Vide et Electronique - BOUTRY (Masson)
- Theory of Photographic Process - NENNETH MEES and JAMES (MacMillan)
- Cryogenic Engineering - RUSSEL and SCOTT (Van Nostrand)
- Vacuum Sealing Techniques - Roth (Pergamon Press)
- Les joints d'étanchéité - LEBEAU - Rapport interne du C.E.R.N. (1969).





